

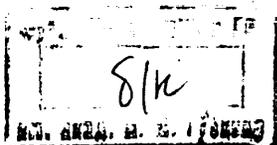
На правах рукописи

Московский ордена Трудового Красного Знамени
институт нефтехимической и газовой промышленности
им. И.М.Губкина

ВОИТЕНКО
ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ, ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
НЕУСТОЙЧИВОСТИ СТВолов СКВАЖИН ПРИ БУРЕНИИ НА
ПОДСОЛЕВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

(05.15.10 - Бурение нефтяных и газовых скважин)



АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 1974

Работа выполнена на кафедре технологии и исследования буровых процессов Московского ордена Трудового Красного Знамени института нефтехимической и газовой промышленности им. И.М.Губкина.

Научные руководители - кандидат технических наук,
доцент Б.С.Филатов,
- кандидат технических наук,
доцент Е.Г.Леонов.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Николай Григорьевич Трупаков,
- кандидат технических наук
Бронислав Васильевич Байдоков.

Будущее предприятие - Речицкое управление буровых работ объединения "Белоруснефть".

Автореферат разослан "25" октября 1974 г.

Защита состоится "26" ноября 1974 г. в 15⁰⁰ часов

на заседании специализированного совета по присуждению учёных степеней по специальности "Бурение нефтяных и газовых скважин" МИИХ и ГИ им. И.М.Губкина.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас принять участие в заседании совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью, по адресу:
г.Москва, В-296, Ленинский проспект, 65, МИИХ и ГИ им. И.М.Губкина,
совет по специальности "Бурение нефтяных и газовых скважин".

Учёный секретарь совета,

доцент

Е.Г.Леонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Обеспечение устойчивости стенок скважин во время бурения и надежности их крепления обсадными колоннами всегда были важнейшей проблемой для отраслей народного хозяйства, связанных с бурением скважин, в первую очередь для нефтегазовой промышленности. Как известно, еще в 1934 году по приказу Наркома топливной промышленности С.Орджоникидзе для концентрации усилий ученых по проблеме борьбы с обвалами стенок скважин была создана колонна из пяти институтов. Однако, удовлетворительного решения проблемы не было найдено ни в те годы, ни позже.

За последнее время значение этой проблемы еще более возросло в связи с существенным увеличением глубин скважин и разбуривании в ряде районов залежей нефти и газа, перекрытых мощными толщами солей.

В зависимости от действия определяющих факторов неустойчивость ствола скважины в соленосных отложениях проявляется в сужении или расширении размеров его поперечного сечения, которые приводят к увеличению объемов циркулирующих жидкостей и смесей для цементирования, проработкам, затяжкам и прихватам бурового инструмента, забуриванию вторых стволов и повреждению обсадных колонн. Работы по борьбе с этими осложнениями, как правило, длительны, трудоемки и нередко заканчиваются ликвидацией скважин. Особенно большие трудности и убытки связаны с нарушениями обсадных колонн в интервалах залегания пластичных соляных и глинистых пород. В этих условиях традиционные методы расчета обсадных колонн на прочность, учитывающих лишь факторы, общие для всей площади, оказались неэффективными. Нередко происходят нару-

шения весьма тяжелых обсадных колонн, рассчитанных на сопротивление полному геостатическому давлению, в то время как в других случаях, при идентичных с точки зрения традиционных методов расчета условиях, подобных нарушений не отмечается.

В связи с вышеизложенным разработка мероприятий, направленных на предупреждение и сокращение осложнений в соленосных отложениях, имеет большое практическое значение.

Цель работы - детализация влияния различных факторов на устойчивость стенок скважин и их крепи и разработка мероприятий по снижению затрат на борьбу с осложнениями, обусловленными неустойчивостью стволов при бурении на подсолевые отложения.

Основные задачи исследований. Изучить характер проявлений горного давления в окрестности скважины и динамику кавернообразования в соленосных отложениях и на этой основе предложить мероприятия по:

- а) прогнозированию скорости сужения ствола скважины;
- б) борьбе с сужением ствола скважины в пластичных породах;
- в) выделению интервалов, опасных в отношении смятия обсадных колонн в пластичных породах;
- г) борьбе с увеличением и сужением размеров поперечного сечения ствола скважины с учетом возможностей использования кавернообразования;
- д) определению реологических свойств пород по промышленным данным.

Научная новизна. Разработаны новые способы прогнозирования скорости сужения ствола скважины с использованием данных испытания ползучести образцов горных пород при одноосном сжатии и определения реологических свойств горных пород по данным исследований в скважинах.

Впервые получены формулы для вычисления удельного веса бурового раствора и времени безопасного ведения работ в скважине с учетом пластической деформации пород и кавернообразования и количественные зависимости предела текучести и пластической вязкости каменной соли от влажности и температуры.

Практическая ценность результатов исследований и пути их реализации. Разработанные рекомендации позволяют снизить затраты на борьбу с осложнениями при бурении на подсоевевне отложения. Результаты исследований проверены и с высокой эффективностью внедрены при бурении в соляных толщах Припятской впадины. Они могут быть использованы и в других подобных районах, а также при разбуривании пластичных пород иного состава.

Апробация работ. Материалы диссертации были доложены на: Всесоюзном семинаре по проблеме "Бурение и крепление скважин в соленосных отложениях", г. Волгоград, 1970 г.; IV научной конференции БелНИГРИ, г. Минск, 1971 г.; научно-техническом совете Актыбинской нефтегазразведочной экспедиции глубокого бурения, г. Актыбинск, 1974 г.; совещании молодых ученых нефтяных ВУЗов страны, г. Москва, 1974 г.

Публикация. Основные положения работы опубликованы в 10 статьях за период 1970-1974 гг.

Объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав и выводов; изложена на 128 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков, 15 приложений и список литературы из 165 наименований.

Автор искренне благодарен руководству Управления Геологии при Совете Министров БССР, главному инженеру треста "Белнефтегазразведка" тов. Азаренко Ф.С., начальнику Калинковичской экспедиции глубокого бурения тов. Евтушенко Г.С., главному инженеру Ре-

чедкой Ордена "Знак Почета" экспедиции глубокого бурения тов. Рябых А.М., начальнику технологического отдела экспедиции тов. Гайду В.З. за постоянную помощь и содействие в сборе промышленных данных и проведении экспериментальных работ в скважинах; сотрудникам МНХ и ИП к.т.н. Еремееву Ю.А., инженеру Вовченко Ю.Л. и старшему лаборанту Фимову Ю.К. за помощь при проведении экспериментальных исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе анализируются представления о напряженно-деформированном состоянии пород в окрестности горных выработок, в том числе буровых скважин, и существующие методы борьбы с неустойчивостью стволов скважин при бурении на подсольевые отложения.

Современная наука о проявлениях горного давления характеризуется применением методов механики твердых деформируемых тел и базируется на основных положениях гипотезы неупругих деформаций, выдвинутой Р.Феннером и развитой в трудах советских и зарубежных ученых: А.Лабасса, К.В.Рупшенейта, Хирамацу Ока, А.Салустовича, Ю.М.Либермана, Х.С.Ержанова и др. Согласно этой гипотезы процессы, происходящие около скважины, объясняются следующим образом. При вскрытии горного массива скважиной в ее окрестности возникает локальное силовое поле с максимальной концентрацией напряжений на контуре ствола. Когда несущая способность пород оказывается недостаточной, то около скважины образуется некоторая предельная область. Породы в этой области претерпевают неупругие деформации от хрупкого разрушения до вязко-пластического течения, увеличивается в объеме и движутся в ствол скважины. Размеры предельной области и скорость движения пород в ствол зависят от геометрических размеров скважины, геостатического давле-

ния, геологических особенностей строения массива, давления столба бурового раствора, механических свойств породы и обусловленных физико-химическим воздействием фильтрата раствора изменений действующих напряжений и несущей способности породы.

Проведение скважины вызывает также нарушение баланса влажности горных пород в пристволевой зоне. Для понимания происходящих при этом явлений большое значение имеют работы П.А.Рейбиндера, Б.В.Дерягина, Н.В.Орнатского, К.Ф.Жигача, Л.К.Мухина, М.Н.Гольдштейна и др. Неравномерно сжатая в стенке скважины порода, находившаяся ранее в горном массиве при определенном влажностном равновесии, получает возможность всасывать фильтрат бурового раствора. В зависимости от того, какие силы принимают главное участие в увлажнении породы, различают адсорбционное (пленочное), осмотическое и капиллярное всасывания. Адсорбционное и осмотическое всасывания сопровождаются набуханием - общим увеличением объема породы, всасывающей воду. Анализ исследований (Дж.Паркер, М.Ченеверт) показывает, что в условиях неограниченной деформации превышение напряжений над исходным в результате набухания породы, не является большим и, по-видимому, определяется ее прочностью на разрыв после увлажнения.

Процессы в окрестности скважины развиваются во времени. Поэтому задачи о напряжениях и деформациях пород в пристволевой зоне должны решаться с учетом явлений ползучести. При этом фактор времени может отражаться во временных операторах - в теории наследственных сред или через коэффициент вязкости - в реологии. Эти параметры находят на основании испытания ползучести породы. Проанализированы способы математической интерпретации процессов деформирования пород во времени эмпирическими формулами, дифференциальными и интегральными уравнениями.

При бурении на подсолонные отложения особенно тяжелые осложнения происходят в глинах и соляных породах, из которых в разрезе нефтяных и газовых месторождений наиболее широко представлена каменная соль. Способы борьбы с осложнениями в этих породах основаны на разработках методов расчета условий устойчивости открытого и закрепленного ствола скважины (Л.А.Шрейнер, Б.В.Байлок, Дж.Томир, Л.А.Фекет, А.А.Гайворонский, Т.Е.Еременко, М.К.Секл-Рза, М.Д.Фаталев, Т.Г.Фараджев, Б.С.Филатов, Г.А.Стрелец, Н.П.Гребенников, А.В.Переяслов, Е.Г.Леонов, Д.В.Даныш, Д.А.Еремеев и др.) и создании буровых растворов, снижающих или предотвращающих растворение и увлажнение соляных, глинистых и терригенно-соляных пород (В.С.Баранов, Э.Г.Кистер, Л.К.Мухин, М.И.Липкес, В.Д.Городнов, О.К.Ангелопуло и др.). Однако, несмотря на достигнутые успехи в борьбе с неустойчивостью стволов скважин в соленосных толщах, особенно в области создания специальных буровых растворов, многие вопросы этой проблемы еще далеки от разрешения. К ним, в частности, относятся вопросы, положенные в основу исследований настоящей работы.

Во второй главе описана методика экспериментальных работ и лабораторные установки.

Опыты проводились на каменной соли, глинистых породах и парафине, взятом в качестве модели вязко-пластического тела.

Сделан краткий критический обзор методов определения реологических свойств пород в условиях простого и сложного напряженных состояний и путем вдавливания стальных шариков в породу. Поскольку результаты испытаний ползучести предназначались для расчетов, то в качестве основного принят метод испытания сплошных цилиндрических образцов в условиях одноосного сжатия.

Небольшой объем реологических исследований произведен при сжатии полых цилиндрических образцов - моделей скважин в камере высокого давления и методом вдавливания шарика.

На основании условий подобия (Б.В.Байдук, Н.С.Тимофеев и др.) и требований стандарта Международного бюро по механике горных пород были выбраны следующие размеры образцов: а) сплошных цилиндрических из каменной соли, глинистых пород и парафина - диаметр 40 мм, высота - 80 мм; б) полых цилиндрических - моделей скважин: из глины и каменной соли - диаметр наружный - 40 мм, внутренний - 8 мм, высота - 50 мм; из парафина - диаметр наружный - 90 мм, внутренний - 13,50+15,25 мм, высота - 90 мм.

Породные образцы готовились прессованием в стальной разъемной матрице. Вещественный состав, объемный вес и влажность породы в образцах соответствовали выбуренному керну и шламу. Об однородности механических свойств получаемых образцов судили по коэффициенту вариации прочности при одноосном сжатии. На основании исследования зависимостей прочности при сжатии образцов каменной соли от объемного веса и коэффициента вариации прочности от давления и скорости прессования выбрали режим прессования. Чтобы получать образцы каменной соли с объемным весом 2,14-2,15 гс/см³, соответствующим ее объемному весу в массиве, прессование производили при давлении 2350 кгс/см² и скорости нагружения 12-14 кгс/см².сек. Такой же режим прессования был сохранен и при изготовлении образцов глинистых пород, предназначенных для качественной оценки влияния буровых растворов на их устойчивость. Коэффициент вариации прочности получаемых образцов каменной соли и глинистых пород составлял 3-5%. Образцы прессовали из измельченной и просеянной через сито с диаметром отверстий 2 мм породы.

Образцы из парафина готовили путем расплавления и заливки последнего в стальные формы нужных размеров. Перед опытами образцы остывали при комнатной температуре в течение 10 суток.

Для изучения влияния на реологические свойства каменной соли температуры и влажности образцы перед опытами отжигали при температуре около 600°C . При исследовании влияния на ползучесть каменной соли равномерно распределенных добавок глины отжиг образцов не производили. Предварительные исследования показали, что предел текучести и пластическая вязкость каменной соли, определенные при комнатной температуре как на отожженных, так и неотожженных перед опытами образцах, имеют практически одинаковые значения.

Для испытания ползучести пород использовался специально переоборудованный для условий сжатия шестисекционный рычажный пресс. Сконструировали и изготовили к прессу приставки для изучения: а) ползучести горных пород в условиях одноосного сжатия при повышенных значениях влажности и температуры; б) влияния буровых растворов на ползучесть пород в условиях одноосного сжатия при комнатной температуре; в) процессов деформирования пород и парафина во времени в условиях сложного напряженного состояния.

Для поддержания постоянства температуры при значениях ее больших 20°C использовались стандартные температурные реле типа ТР-200, которые допускали отклонение температуры от заданных значений до $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

При необходимости образцы каменной соли увлажняли в заливочной рассолом *NaCl* поваренной соли. Процесс увлажнения контролировали взвешиванием. Затем, если влажность образцов была

достаточной, их помещали в отдельный эксикатор и выдерживали для выравнивания влажности во всем образце перед опытами в течение месяца. Увлажнение образцов до максимальной влажности, среднее значение которой составило 1,1%, происходило за 5-6 суток. Для предохранения от высыхания образцы изолировали покрытием резиновым клеем, парафином и двойной резиновой пленкой.

Испытания ползучести образцов в условиях контакта с буровым раствором при объемном напряженном состоянии производились по известным методикам (Б.В.Байлюк, Л.К.Мухин, М.К.Сеид-Рза и др.). Через отверстие полого образца непрерывно циркулировал испытуемый раствор со скоростью 0,5-0,7 м/сек и давлением, близком к атмосферному. Для исключения влияния сил трения зазор между образцом и внутренней стенкой матрицы заполняли пластилином, через который на образец передавалось боковое давление, равное вертикальной нагрузке.

В опытах на одноосное сжатие через 10 мин. после центрального нагружения в сосуд прибора заливали раствор в количестве 1,5 л.

В процессе всех испытаний продольную деформацию по всей высоте образца или на части ее (базе) измеряли с помощью механических индикаторов МИГ с ценой деления 0,01 и 0,002 мм. Сужение отверстий в образцах-моделях скважин, изготовленных из парафина, измеряли с помощью набора дюралюминиевых пробок (Д.В.Данш).

Основной объем промышленных исследований проведен с помощью повторной кавернометрии.

В третьей главе приведены результаты исследований прочности и ползучести каменной соли и глинистых пород.

Приводятся данные опытов по изучению влияния температуры, влажности и примеси глины на механические свойства каменной соли. Образцы каменной соли в условиях одноосного сжатия испытывались при: а) влажности $W \leq 0,04\%$ и температурах 20, 100, 150 и 210°C; б) комнатной температуре и влажности 0,04, 0,08, 0,13, 0,53 и 1,1%; в) влажности 0,08%, комнатной температуре и добавках равномерно распределенной по образцу примеси воротыщенской глины, равных 2, 4 и 8%.

Установлено, что прочность образцов каменной соли с повышением температуры до 100–150°C увеличивается примерно на 20%, а при дальнейшем увеличении температуры быстро снижается. С увеличением влажности прочность каменной соли падает. Особенно резко, приблизительно в два раза, прочность снижается при увлажнении каменной соли от 0,04 до 0,3%. При дальнейшем повышении влажности до 1,1% прочность каменной соли уменьшается примерно на 20%. Примесь глины до 8% по весу снижает прочность образцов каменной соли от 600 до 400 кгс/см².

По данным испытания ползучести построены реологические кривые каменной соли при различных значениях температуры и влажности, отображающие характер изменения градиента скорости продольной деформации $d\varepsilon/dt$ от нормальных напряжений σ_z . Градиенты скорости $d\varepsilon/dt$ при испытаниях соответствовали градиентам скорости деформирования каменной соли в скважинах, составляя $10^{-9} + 10^{-7}$ сек⁻¹. Градиенты скорости деформирования каменной соли в скважинах были определены по данным повторной кавернометрии. На всех реологических кривых выявлены напряжения, при которых скорость установившейся ползучести резко возрастает. Эти напряжения приняты за пределы текучести каменной соли при одноосном сжатии σ_z . При напряжениях больших σ_z зависимость

$\frac{d\varepsilon}{dt}(\sigma_T)$ на участке изменения градиента скорости $d\varepsilon/dt$ в пределах примерно двух порядков близка к линейной. За величину пластической вязкости каменной соли при одноосном сжатии η_0 принято численное значение котангенса угла наклона этого участка реологической кривой к оси напряжений σ_T . Выявлено, что в исследованном диапазоне влажность оказывает более сильное влияние на реологические свойства каменной соли, чем температура. На основании реологических кривых построены кривые зависимостей $\sigma_T(T)$, $\eta_0(T)$, $\sigma_T(W)$ и $\eta_0(W)$, которые аппроксимированы эмпирическими формулами:

$$\sigma_T = 350T^{-0,16}; \quad \eta_0 = 10^{13} (187,5 - 78,5 \lg T) \quad (1)$$

при $20^\circ\text{C} \leq T \leq 210^\circ\text{C}$ и $W \leq 0,04\%$;

$$\sigma_T = 79,43W^{-0,30}; \quad \eta_0 = 10^{11,82} W^{-2,20} \quad (2)$$

при $0,04 \leq W \leq 1,10\%$ и $T = 15 - 20^\circ\text{C}$.

Сравнением значений пределов текучести и прочности каменной соли при сжатии установлены следующие зависимости: $\sigma_T = (0,25 - 0,35)\sigma_{сж}$ - для температуры и $\sigma_T = (0,32 - 0,36)\sigma_{сж}$ - для влажности.

Выявлено, что добавка 2% равномерно распределенной примеси глины примерно в два раза уменьшает скорость ползучести каменной соли. При дальнейшем увеличении количества примеси глины пластические свойства каменной соли начинают улучшаться.

Результаты испытания ползучести образцов каменной соли и вортыщенской глины в условиях контакта с буровыми растворами представлены в виде кривых ползучести $\varepsilon(t)$. Установлено, что эти кривые, полученные как при одноосном сжатии, так и при сложном напряженном состоянии в полых образцах, позволяют дать одинаковую качественную оценку пригодности испытанных растворов при бурении

в указанных породах.

В четвертой главе изложены выводы формул для расчета скорости сужения ствола скважины, удельного веса бурового раствора и времени безопасного ведения работ при пластических деформациях пород, слагающих стенки скважины, и способ определения реологических свойств пород по данным исследований в скважинах.

Задача решена с рядом упрощающих допущений. Скважина представляется как полый цилиндр, нагруженный горным давлением и внутренним давлением столба бурового раствора. Горные породы полагаются не взаимодействующими с фильтратом бурового раствора и аппроксимированы вязко-пластичной средой. Состояние деформирования принято плоским, а условие текучести - по теории формоизменения Губера-Мизеса-Генки.

Распределение напряжений в окрестности скважины найдено подстановкой принятого условия текучести в уравнение равновесия и интегрированием последнего.

Из уравнения, описывающего изменение вертикальной компоненты напряжений в области неупругих деформаций пород, получена формула для определения радиуса ρ предельной области:

$$\rho = 0,61 a \exp \frac{P_r - P_p}{1,156 \tau} , \quad (3)$$

где: a - начальный радиус скважины; $P_r = \gamma_n H$ - геостатическое давление; $P_p = \gamma_p H$ - давление столба бурового раствора; γ_n - средневзвешенное значение объемного веса породы; γ_p - удельный вес раствора; H - расстояние от поверхности до рассматриваемого сечения ствола скважины.

В теории пластичности принято, что компоненты тензора скорости деформаций пропорциональны соответствующим компонентам

девиатора напряжений. Исходя из этого условия и уравнений, характеризующих распределение напряжений около скважины, проделав ряд преобразований, получили формулу для расчета скорости сужения ствола в пластически деформирующихся породах:

$$V = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_T}{\eta_0} (\rho - a). \quad (4)$$

Произведена опытная проверка формулы (4) путем изучения сужения отверстий в образцах-моделях скважины, изготовленных из парафина. Предел текучести $\sigma_T = 1,75 \cdot 10^4$ кгс/м² и вязкость $\eta_0 = 1,38 \cdot 10^{11}$ кгс.сек/м² парафина определяли испытанием его ползучести. В результате расчетов по формуле (4) построена кривая, удовлетворительно совпадающая с опытными данными.

Из уравнения (4) при скорости $V = 0$ получена формула для расчета удельного веса бурового раствора, при котором обеспечивается длительная устойчивость ствола скважины:

$$\gamma_p = \gamma_n - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_T}{H}. \quad (5)$$

Однако процесс бурения может нормально осуществляться и в том случае, когда скорость $V > 0$. Это оказывается возможным, если скорость кавернообразования $U_k \geq V$. С учетом кавернообразования получены формулы для расчетов:

а) удельного веса бурового раствора, обеспечивающего безопасное ведение работ в скважине в течение времени t_s :

$$\gamma_p = \gamma_n - \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_T}{H} \ln \left[\frac{(D_n - D_n) \eta_0}{1,05 a t_s} + 1,65 \right]; \quad (6)$$

б) времени безопасного производства работ в скважине при данном удельном весе бурового раствора γ_p :

$$t_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{(D_n - D_n) \eta_0}{\sigma_T (\rho - a)}; \quad (7)$$

где: D_n - диаметр скважины перед началом работ (бурение ниже интервала залегания пластичных пород, спуск обсадной колонны или испытателя пластов, электрометрические исследования и т.д.);

D_n - минимально допустимый диаметр скважины, обеспечивающий прохождение долота, муфты обсадной трубы, электрометрических приборов и т.д. мимо интервала пластичных пород.

На основании аналитической зависимости (4) и измерений скорости сужения ствола скважины разработан способ определения реологических свойств пород в промышленных условиях, суть которого заключается в следующем.

Путем утяжеления бурового раствора или повышения давления на устье скважины при закрытых превентерах находят удельный вес раствора, при котором скорость $V = 0$. При этом условии находят ся предел текучести породы по формуле:

$$\sigma_r = \sqrt{3} (P_r - P_p) . \quad (8)$$

По прохождению бурильного инструмента мимо пластичных пород или повторными измерениями каверномерами определяется фактическая скорость сужения ствола $V_p = (D_{max} - D_{min}) / 2t$. Здесь D_{max} ,

D_{min} - диаметр скважины при первом и последующем измерениях; t - время между измерениями. При известной скорости сужения ствола пластическая вязкость породы вычисляется по формуле:

$$\eta_0 = \frac{\sqrt{3} \sigma_r t a}{D_{max} - D_{min}} \left(0,61 \exp \frac{P_r - P_p}{1,156 \tau} - 1 \right) . \quad (9)$$

Для оценки предложенного способа определения реологических свойств пород, а также зависимости (4) использованы результаты лабораторных и промышленных исследований скоростей сужения стволов

скважин в бишофите ДДВ (данные Г.А.Стрельца и др.) и пластичных глинах ливенского горизонта Припятской впадины (данные наши, Д.В.Даныша и др.). С помощью формул (8) и (9) получили для бишофита (при $T=50-53^{\circ}\text{C}$) $\sigma_{\tau} = 110 \cdot 10^4 \text{ кгс/м}^2$, $\eta_0 = 2 \cdot 10^{11} \text{ кгс.сек/м}^2$ и глины $\sigma_{\tau} = 60 \cdot 10^4 \text{ кгс/м}^2$, $\eta_0 = 2,6 \cdot 10^{11} \text{ кгс.сек/м}^2$. Используя эти параметры, с помощью формулы (4) для указанных пород построили кривые $v = f\left(\frac{P_1 - P_2}{\sigma_{\tau}}\right)$, достаточно хорошо совпадающие с лабораторными и промышленными данными.

Пятая глава посвящена применению результатов исследований для объяснения, предупреждения и использования неустойчивости стволов скважин при бурении на подсолевые отложения.

В первом параграфе изложен анализ осложнений, происходящих в пластичных глинах ливенского горизонта Припятской впадины в виде проработок, затяжек и прихватов бурильного инструмента и смятий обсадных колонн. Особенности неустойчивого поведения этих глин, выявленные при рассмотрении промышленных данных по 42 скважинам, объяснены на основе гипотезы неупругих деформаций пород. При этом сделан вывод о том, что если из предельной области убрать объем породы, равный разности объемов породы, заключенной в этой области, до и после перехода породы в предельное состояние, то скорость сужения ствола может стать настолько малой, что нормальный процесс бурения нарушаться не будет. Объем породы, подлежащей отбору из предельной области, предлагается определять по формуле:

$$\Delta V = \pi h (m-1)(\rho^2 - a^2), \quad (10)$$

где: h - мощность пласта пластичных пород, $m = \frac{V_2}{V_1}$ - коэффициент разрыхления породы, для глинистых пород в первом приближе-

или можно принимать $m = 1, 10-1, 15$ (А. Лабасс, В. В. Матвеев); V_1, V_2 - объемы породы, заключенной в пределах области, соответственно до и после перехода в предельное состояние.

Высказанные положения и рекомендации подтверждены промышленными исследованиями. Применение метода отбора породы из предельной области особенно эффективно при наличии в разрезе скважины поглощающих горизонтов, когда борьба с сужением ствола в пластичных породах путем утяжеления раствора затруднена.

Во втором параграфе описана предложенная упрощенная методика выбора бурового раствора, обеспечивающего наибольшую устойчивость пород в стенках скважины.

Согласно этой методике для выбора бурового раствора нужно: в одной из первых скважин на площади отобрать породу из неустойчивых интервалов (в виде керна или шлама), изготовить из нее образцы и провести испытания ползучести в условиях одноосного сжатия образцов в среде различных буровых растворов. Кривая ползучести с меньшим наклоном к оси времени будет соответствовать раствору, который обеспечит наибольшую устойчивость породы в стенке скважины.

Эффективность методики проверена на примере оценки влияния буровых растворов на устойчивость аргиллитов Речицкой площади Припятской впадины. В процессе исследований выявлена зависимость между расположением кривой ползучести образца аргиллита в среде бурового раствора и коэффициентом кавернообразования ствола скважины при бурении аргиллитов с промывкой этим раствором. Анализ полученных данных также показал, что при прочих одинаковых условиях основную роль в сохранении устойчивости породы играет рецептура бурового раствора, а не водоотдача, на которую обычно ориентируются в промышленной практике. Однако для

одного и того же типа раствора и реагентов уменьшение водоотдачи увеличивает устойчивость породы.

В третьем параграфе рассмотрены закономерности кавернообразования в соленосных отложениях и возможности его использования. Предложено условие для использования кавернообразования:

$$2d_3 > d_c = K d_g \leq d_m + 2\delta, \quad (II)$$

где: d_3, d_c, d_m - диаметры соответственно замка бурильной трубы, скважины, долота и муфты обсадной трубы; $K = d_c/d_g$ - коэффициент кавернообразования; δ - принятый зазор между муфтой обсадной трубы и стенкой скважины.

Условие $2d_3 > d_c$ позволяет избежать установки в два ряда бурильных труб при двойном сломе бурильной колонны, а при $d_c = d_m + 2\delta$ - отпадает необходимость в расширении ствола перед спуском обсадной колонны. Когда в разрезе скважины одновременно имеются пластически деформирующиеся породы и поглощающие горизонты, то во многих случаях бурение может быть успешным только при $U_k \geq U$ (здесь U_k, U - скорости соответственно кавернообразования и сужения ствола). Снизить затраты на борьбу с кавернообразованием и добиться выполнения условия $2d_3 > d_c$ при $U_k > U$ можно путем перехода на бурение скважины опережающим стволом. Поскольку бурение этим способом в породах мягких и средних по твердости эффективно (И.В.Дияк, Г.Г.Семак, Н.С.Тимофеев и др.), то направленное использование кавернообразования в соляных толщах будет выгодным и при $d_c < d_m + 2\delta$ перед спуском обсадной колонны. Путем обработки данных повторной кавернометрии, проведенной в верхней соленосной толще по 30 скважинам (в каждой скважине произведено 3-5 измерений диаметра ствола) Припятской впадины, установлено, что размер и

конфигурация ствола в процессе формирования каверн в соленосных отложениях позволяет выполнить условие (II).

В четвертом параграфе изложены способы выделения интервалов, опасных в отношении смятия обсадных колонн в пластичных породах.

В соответствии с гипотезой о неравномерном нагружении обсадных труб пластически деформируемыми породами (Д.А.Бремеев, Е.Г.Леонов, Б.С.Филатов) за опасные интервалы приняты те части разреза скважины, где контактное давление породы превышает минимальное сжимающее контактное давление обсадной трубы. При самом неблагоприятном угле обхвата обсадных труб деформируемыми породами, равном 50° , задача выделения опасных интервалов сводится к определению скорости \dot{U} сужения ствола скважины и эффективной вязкости η^* породы, необходимых для расчета контактного давления породы. По данным повторной кавернометрии выделить интервал сужения ствола в разрезе скважины можно только в том случае, когда скорость $\dot{U} > \dot{U}_k$. Определить скорость \dot{U} в этом интервале удастся при условии $(\dot{U} - \dot{U}_k)t > 2\Delta$, если будет известна величина скорости кавернообразования \dot{U}_k . Здесь Δ - абсолютная погрешность каверномера. Поэтому для решения задачи выделения опасных интервалов предлагается: скорость \dot{U} определять по формуле (4), а эффективную вязкость η^* при известном значении пластической вязкости η_0 оценивать с помощью выражения $\eta^* \approx \frac{1}{3} \eta_0$ (по М.Рейнеру с учетом, что пластическая вязкость породы при сдвиге $\eta_c \approx \eta^*$). Для каменной соли можно так же пользоваться эмпирической зависимостью $\eta^* \approx 0,14 \eta_0$. Значение вязкостей, входящие в приведенные выражения, должны определяться при одинаковых градиентах скорости деформирования по-

роды при испытаниях ее ползучести различными методами.

Способ проверили, используя данные повторной кавернометрии в каменной соли и полученные на основании лабораторных испытаний зависимости (1) и (2). Наложением друг на друга кавернограмм в 12-ти из 30-ти подвергнутых обследованию скважинах было выделено 38 интервалов сужений в каменной соли, залегающей на глубинах 2000-4000 м. Скорость сужения ствола в этих интервалах составила $(0,5-29) \cdot 10^{-9}$ м/сек. Для выделенных интервалов с помощью формулы (4) и зависимостей (1) и (2) рассчитали скорости \dot{U} , значения которых нанесли на график $\dot{U} = f(P_p - P_p)$. На этот же график нанесли значения скоростей, полученные с помощью повторной кавернометрии. Далее, с применением зависимостей (1), (2), (4) и выражения для эффективной вязкости были произведены оценочные расчеты обсадных колонн в 39 скважинах Припятской впадины на неравномерное горное давление каменной соли в диапазоне изменения ее предела текучести и вязкости для условий залегания. В результате расчетов установлена возможность "запайки" каменной солью неравномерно нагружаемых обсадных труб, имеющих коэффициент запаса прочности на смятие геостатическим давлением меньше единицы.

На основе анализа результатов исследований сделан вывод о том, что разработанный метод является эффективным и в большинстве случаев единственно возможным средством выделения опасных интервалов. При точном знании реологических параметров пластичных пород он позволяет выбирать для их перекрытия надежные и экономичные обсадные трубы.

Основные выводы

1. Разработан способ прогнозирования скорости сужения ствола скважины в пластически деформирующихся породах на основании испытания их ползучести в условиях одноосного сжатия и полученной аналитической зависимости.

2. Предложены формулы для расчёта удельного веса бурового раствора и времени безопасного ведения работ в скважине с учетом одновременно протекающих процессов кавернообразования и сужения ствола.

3. Разработан способ определения реологических свойств пород по данным исследований в скважинах.

4. Экспериментально исследовано влияние температуры, влажности и примеси глины на прочность и ползучесть каменной соли. Зависимости предела текучести и пластической вязкости каменной соли при одноосном сжатии от температуры и влажности аппроксимированы эмпирическими формулами.

5. С помощью повторной кавернометрии исследовано изменение во времени размера ствола скважины в соленосных отложениях. Показано, что затраты на борьбу как с сужением, так и увеличением размеров поперечного сечения ствола скважины можно снизить, если использовать кавернообразование направленно. Предложены условия использования кавернообразования.

6. Установлена ограниченность возможностей кавернометрии при определениях интервалов и скоростей сужений ствола по разрезу скважины. Разработан расчетный способ выделения интервалов, опасных в отношении смятия обсадных колонн в пластичных породах.

7. Экспериментально показана возможность получения качественно одинаковой информации при изучении влияния бурового раствора на ползучесть каменной соли и глинистых пород как в условиях одноосного сжатия, так и при сложном напряженном состоянии в полном образце. Предложено пригодность бурового раствора для бурения оценивать по кривым ползучести при одноосном сжатии образцов пород в его среде.

8. Установлено, что удаление некоторого количества породы из предельной области, образующейся около скважины, может быть эффективным средством борьбы с сужением ствола скважины в пластичных породах. Предложен метод определения объема породы, подлежащей удалению из предельной области.

Основное содержание работы опубликовано в следующих статьях:

1. Ештушенко Г.С., Березуцкий В.И., Войтенко В.С., Гайда В.А., Азаренко Ф.С. "Опыт бурения глубокой скважины № 7 - Шатилковской площади". РНТС, сер. "Бурение", вып. 6, 1970 г.

2. Войтенко В.С., Березуцкий В.И. "Смятие обсадной колонны в Березинской опорной скважине I" В сб. "Материалы IV научной конференции молодых геологов Белоруссии". г. Минск, 1971 г.

3. Войтенко В.С. "Использование кавернообразования при бурении скважин в соленосных отложениях на площадях Белоруссии". РНТС, сер. "Бурение", вып. 4, 1972 г.

4. Березуцкий В.И., Ештушенко Г.С., Войтенко В.С., Азаренко Ф.С. "Бурение разведочных скважин от нуля до проектной глубины с промывкой засоленным буровым раствором". РНТС, сер. "Бурение", вып. 5, 1972 г.

5. Войтенко В.С. "Анализ причин смятия обсадных колонн при бурении скважин на территории Припятской впадины", РНТС, сер. "Бурение", вып. 6, 1972 г.

6. Войтенко В.С. "К вопросу прогнозирования проявлений горного давления при бурении глубоких скважин в соленосных отложениях". Труды МИНХ и ГП им. И.М.Губкина, сб. "Нефть и газ", М., 1973 г.

7. Войтенко В.С., Леонов Е.Г., Филатов Б.С. "Выбор типа промывочной жидкости, обеспечивающей наибольшую устойчивость пород на стенках скважин". РС "Бурение газовых и газоконденсатных скважин", № 2, изд-во ВНИИГАЗПРОМ, 1974 г.

8. Войтенко В.С., Леонов Е.Г., Филатов Б.С., Бутушенко Г.С., "Использование особенностей поведения неустойчивых глинистых пород для борьбы с сужением стволов скважин". РНТС, сер. "Бурение", вып. 7, 1974 г.

9. Войтенко В.С., Леонов Н.Г., Филатов Б.С., Бутушенко Г.С. "Направленное использование кавернообразования при бурении в соленосных отложениях", "Газовая промышленность", № 8, 1974г.

10. Войтенко В.С., Леонов Е.Г., Филатов Б.С. "Прогнозирование скорости сужения ствола и расчет важнейших технологических параметров при пластических деформациях пород, слагающих стенки скважин". "Нефтяное хозяйство", № 8, 1974г.