

На правах рукописи

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
им. И.М.Губкина

ЕРЕМЕЕВ ЮРИИ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ СМЯТИЯ ОБСАДНЫХ ТРУБ В ПЛАСТИНЧАТЫХ
ПОРОДАХ

(05.15.10 - Бурение нефтяных
и газовых скважин)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1974

Работа выполнена на кафедре технологии и исследований
буровых процессов Московского института нефтехимической и га-
зовой промышленности имени И.М.Губкина

Научные руководители - кандидат технических наук
доцент Б.С.Филатов

- кандидат технических наук
доцент Е.Г.Леонов

Официальные оппоненты - доктор технических наук
А.А.Гайворонский

- кандидат технических наук
Б.В.Байдж

Будущее предприятие - Полтавское управление буровых работ
объединения "УКРНЕФТЬ".

Автореферат разослан "5" апреля 1974г.

защита диссертации состоится "7" мая 1974г.
на заседании Совета по присуждению ученых степеней по спе-
циальности "Бурение нефтяных и газовых скважин" МИНХ и ГП
им.И.М.Губкина.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке инсти-
тута.

Просим Вас принять участие в заседании Совета или
прислать отзыв в двух экземплярах по адресу: 117296,
г.Москва, Ленинский проспект, 65, МИНХ и ГП им.И.М.Губкина,
Совет по специальности "Бурение нефтяных и газовых скважин".

Ученый секретарь Совета
доцент

Е.Г.Леонов

Ежегодные убытки от аварий с обсадными колоннами в нефтяных и газовых скважинах, пробуренных через толщи соленосных отложений в различных районах СССР, превышают несколько миллионов рублей.

По неполным данным, за последние 10 лет /1963-73г.г./ обсадные трубы были повреждены в 84 скважинах, вскрывших указанные отложения. Примерно столько же случаев нарушения обсадных труб за это же время произошло в скважинах, пробуренных в пластичных глинистых породах. В большинстве отмеченных случаев повреждения обсадных труб послужили причиной ликвидации скважин. Десятки случаев деформации обсадных труб в соляных породах известны также в скважинах на территории США, ФРГ, Польши, Румынии.

Эти факты свидетельствуют о том, что в интервалах, осложненных соляными и глинистыми породами, существующие методы расчета обсадных труб не всегда соответствуют реальным условиям их нагружения.

Диссертация посвящена исследованию величины контактного давления соляных пород на обсадные трубы и прочности труб при одновременном действии на них неравномерно приложенного по периметру кольцевого сечения труб контактного давления пород и гидравлических наружного и внутреннего давлений (рассмотрено плоское напряженное состояние).

Работа состоит из предисловия, пяти глав и выводов, изложена на 136 страницах, содержит 86 рисунков, 7 приложений и библиографию из 174 наименований.

Автор искренне благодарен руководству и сотрудникам Полтавского отделения УкрНИГРИ за помощь при проведении части экспериментов, сотрудникам МИНХиГП: доценту Е.М.Соловьеву, старшему научному сотруднику В.И.Исаеву, аспиранту В.С.Войтенко и лаборанту Ю.Л.Вовченко.

Обзор состояния проблемы давления горных пород на крепь шахт и скважин и методов расчета последней показал, что:

8/11

По отношению к вертикальным выработкам в горном деле было предложено четыре основных гипотезы о горном давлении: гипотеза восстановления естественного напряженного состояния /М.М.Протодьяконов, П.М.Цимбаревич, А.Н.Динник, Б.Т.Проявкин, А.П.Максимов и др./; гипотеза свода /М.П.Броцкий, П.М.Цимбаревич, Ю.А.Онщенко и др./; гипотеза об отсутствии давления горных пород на крепь /Н.М.Покровский и др./ и гипотеза взаимодействия крепи и породы при совместной деформации, высказанная впервые Р.Феннером и развитая позднее А.Лабассом, Г.Н.Савиным, Ф.А.Белаенко, Л.Б.Ершовым, К.Б.Руппенейтом, Ю.М.Либерманом, В.В.Матвиенко, Ю.А.Песляком и др.

Три первые гипотезы имеют лишь историческое значение; современному состоянию науки о горном давлении в наибольшей степени отвечает последняя. Главные ее положения следующие:

в приствольной зоне выработки вследствие концентрации напряжений образуется "зона неупругих деформаций", что проявляется в сужении сечения выработки за счет увеличения объема породы в этой зоне; крепь препятствует развитию радиальных смещений пород в силу своей жесткости; давление горных пород на крепь снижается с развитием их совместной деформации /чем более податлива крепь, тем меньше давление она должна испытывать/.

Методика расчета давления горных пород на крепь шахтных стволов, основанная на гипотезе деформаций, высоко оценивается Г.А.Крупениковым, Н.С.Булчевым, А.М.Козелом, Н.А.Филатовым и Ю.М.Либерманом, так как, по их данным, результаты расчетов по ней наиболее близки к замеренным.

Но инструментальных исследований горного давления на сегодня проведено слишком мало для строгой оценки расчетных методов, а многочисленные случаи повреждения крепи шахтных стволов горными породами, описанные указанными выше авторами а также А.С.Селивановым,

В.Эбелингом и др. говорят о том, что расчетные и действительные давления горных пород нередко расходятся.

Одна из главных особенностей, отмеченная при инструментальных исследованиях давления горных пород - неравномерность его распределения по периметру крепи вертикальных выработок, меньшая в более пластичных породах и выработках правильного очертания.

Все указанные выше гипотезы о горном давлении, по мере их распространения в горном деле, предлагались и для расчета давления горных пород на обсадные трубы в скважинах, с учетом или без учета особенностей технологии их бурения и крепления (работы Н.Н.Смирнова, А.С.Станишевского, А.А.Завадского, Т.Е.Еременко, А.А.Линевского, Г.М.Саркисова, Ю.А.Песляка, К.В.Руппенеята, А.А.Гайворонского, Г.А.Стрельца и др.).

Для случая равномерного распределения давления соляных или пластичных глинистых пород на обсадные трубы, в практических его расчетах можно было бы пользоваться рекомендациями Ю.А.Песляка и К.В.Руппенеята или Г.А.Стрельца и др. (при условии правильной оценки реологических свойств указанных пород в конкретных условиях). Но, как показывает анализ многочисленных повреждений обсадных колонн (см. ниже) гарантировать реализацию равномерной схемы нагружения труб (наиболее благоприятной для них) в условиях ползучести соляных или глинистых пород в скважинах практически невозможно. Методов же расчета неравномерного давления деформирующихся горных пород на обсадные трубы ни один из указанных выше авторов не предлагает.

Известна попытка американских исследователей Д.Читхема и Д.Мак Эвера экспериментально оценить величину контактного давления каменной соли на обсадные трубы. Но опубликованный ими частный результат нельзя переносить в реальные условия, так как неизвестны параметры моделирования последних.

Вопросы расчета круговой крепи под действием гидравлического давления в значительной мере решены. Несколько хуже, но также достаточно полно, исследованы вопросы устойчивости крепи, деформации которой ограничены твердой оболочкой (работы Е.Д.Николаев, Г.Линка, К.Федерхофера и Е.Амштутца, Ф.Гертриха, Ю.А.Несляка, К.Б.Руппенея-та, А.А.Гайворонского, К.А.Владимирова, Л.Б.Измайлова и др.). Цементная (бетонная) оболочка, окружающая стальные трубы или чугунные тубинги, может увеличить их устойчивость от действия гидравлического давления от нескольких десятков процентов (опыты А.А.Гайворонского, Л.Б.Измайлова) до 3 раз (опыты Ф.Гертриха).

Теоретическое решение М.Я.Леоновым, В.В.Панасюком задачи об устойчивости обсадных труб, воспринимающих всестороннее равномерное давление упругого тела, дает основание считать, что при реализации в скважинах рассмотренной указанными авторами схемы нагружения, за устойчивость труб можно было бы не опасаться - в этом случае она приблизительно на порядок выше устойчивости труб в жидкости. Но, горные породы в упругом состоянии не могут оказать давления на обсадные трубы, так как упругие деформации пород проявляются задолго до спуска обсадных колонн в скважину.

Решения задачи о сопротивляемости обсадных труб равномерному давлению пластичных горных пород неизвестно. Предварительные опыты И.К.Майорова и И.А.Грипенко, направленные на восполнение этого пробела, показывают, что трубы, воспринимающие равномерное давление соляных пород, целесообразно рассчитывать только на прочность, без учета овальности. По их данным, критическое давление колец, нагруженных хлористым магнием, превышало критическое гидравлическое давление этих же колец более чем в 3,5 раза.

Опасность неравномерного нагружения обсадных труб горными породами, показанная Г.А.Саркисовым, Д.Нестером, Д.Дленкиным и Симо-

ном, Д.Читхемом и Д.Мак Эвером, Т.Е.Еременко и П.А.Вислобицким,, И.Г. и Э.И.Узумовыми и др. может быть существенной: прочность труб, при рассмотренных указанными авторами схемах неравномерного нагружения, снижается по сравнению с гидравлической до 8-10 раз. Однако, основным препятствием на пути практического использования всех без исключения расчетных схем неравномерного нагружения обсадных труб, предложенных указанными выше авторами, является отсутствие рекомендаций по прогнозированию расчетной схемы вообще и схемы распределения давления реальных горных пород в частности в конкретных ситуациях.

С целью выявления общности в причинах повреждения обсадных колонн, перекрывающих соленосные отложения в различных районах СССР, нами систематизированы данные по 84 случаям нарушений обсадных труб в скважинах, пробуренных на территории Украины, Белоруссии, Волгоградской и Саратовской областей, Краснодарского края, Узбекистана, Туркмении и Казахстана. Рассмотрены также некоторые повреждения труб в глинистых породах, не входящих в состав соленосной толщи. Эти данные иллюстрированы кавернограммами, профилеграммами, результатами детализации профилей стволов некоторых скважин в соленосных отложениях с помощью радиусомеров, зарисовками отпечатков некоторых деформированных участков обсадных труб на свинцовых печатях и др.

Сравнение опыта бурения скважин в указанных районах показало, что повреждениям обсадных колонн в большинстве случаев предшествовали осложнения при бурении соляных или глинистых пород, вызванные их пластической деформацией, интенсивность которой зависит от литологического состава пород соленосной толщи, глубины их залегания, пластовой температуры, плотности применяемой промывочной жидкости и других факторов.

Расчетами показано, что в 35% случаев повреждений колонн полная величина геостатического давления была меньше прочности обсадных труб на смятие гидростатическим давлением с учетом давления столба промысловых жидкостей в колонне; в двух случаях - равна и в остальных - больше. При уменьшении геостатического давления соляных пород на величину их длительного предела ползучести (согласно методике Г.А.Стрельца и др.), количество случаев повреждения обсадных труб при прочности на смятие, большей геостатического давления пород, при равномерном его распределении по периметру труб, возрастает до 70%.

При оценке прочности труб на смятие по формуле Ляме (Гадолина), соотношение прочности труб и геостатического давления пород распределяется следующим образом: только в 14% случаев величина геостатического давления массива могла быть выше прочности труб на смятие с учетом давления жидкости внутри обсадной колонны. В остальных 86% случаев обсадные трубы не могли быть повреждены равномерно распределенным давлением горных пород. Если, при расчете труб на прочность, давление горных пород уменьшить на величину их предела ползучести, то ни в одном из рассмотренных случаев обсадные трубы не могли быть повреждены равномерно распределенным геостатическим давлением.

Рассмотрение возможности реализации в аварийных ситуациях избыточного (превышающего геостатическое) давления, источниками которого, по мнению Н.П.Гребенникова, могут быть фазовые превращения солей при растворении; С.В.Ткачина и У.Д.Мамаджанова, - гидратация ангидрида; С.С.Григоряна, А.И.Караева, А.Х.Мирзаджанзаде и др., - температурное расширение жидкости в изолированном пластичными породами затрубном пространстве скважин, показало, что она недостаточно обоснована.

Основной причиной повреждения обсадных труб в соленосных и пластичных глинистых отложениях, бурение которых сопровождается осложнениями из-за сужения (с одновременным растворением) стенок скважин, по нашему мнению, является течение соляных и глинистых пород.

Особенностями характера деформации обсадных труб, подверженных давлению деформирующихся пород, отличающимися повреждение труб в этом случае от смятия их гидравлическим давлением, является длительность и прогрессирование во времени сужения сечения колонны с переходом его в форму эллипса, иногда сопряженное с местным поперечным изгибом колонны, в отдельных случаях вплоть до ее разрыва и разведения концов в разные стороны.

Зарубежный опыт крепления скважин в соленосных отложениях (Д. Клегг) показывает, что положительный результат дает применение для крепления участков скважин, осложненных течением соляных пород, высокопрочных труб малого диаметра с запасом прочности на смятие равномерным геостатическим давлением около трех.

Выводы, сделанные нами в результате последовательного исключения возможных причин повреждения обсадных колонн в рассмотренных ситуациях, позволяют предположить, что в условиях течения соляных или глинистых пород наиболее вероятно неравномерное нагружение труб. При этом, давление деформирующихся пород, приводящее к повреждению труб, должно быть приложено лишь к части периметра их наружной поверхности. В противном случае, т.е. при полном обхвате трубы породой, как показал К.В.Руппенейт и др., возникающие по контактной поверхности касательные усилия значительно снижают эффект неравномерности распределения давления по периметру труб. Следует также иметь в виду, что в пластичных породах с течением времени происходит перераспределение и выравнивание напряжений. Это предположе-

ние подтверждается также результатами инструментальных исследований конфигурации стволов скважин в соленосных отложениях.

Результаты съемок гидролокатором "Луч" ЛТИ, измерений детализационным прибором "Спрут" Е.М.Пятацкого и данные стандартной профилометрии показывают, что горизонтальные сечения скважин, пробуренных в соляных породах с помощью буровых растворов на водной основе, как правило, имеют форму вытянутых четырехугольников, треугольников, эллипсов. Соотношение сторон (радиусов) этих фигур в некоторых случаях достигает 1:3, 1:4.

Следует заметить, что искажение первоначально круглой формы поперечного сечения вертикальной выработки, по мнению О.Якоби, А. Надаи, Р.Рихтера, С.А.Кеворкова может быть следствием несимметричности деформации ее стенок в условиях трехосного напряженного состояния и без участия растворителя.

Естественно предположить, что одновременное касание деформирующихся стенок скважины, имеющей вытянутую форму поперечного сечения, с обсадными трубами по всему периметру их наружной поверхности, при отсутствии качественного цементного кольца в затрубном пространстве, в первоначальный период контакта маловероятно. Следовательно, в этот период маловероятно и равномерное нагружение обсадных труб. В рассмотренных выше случаях повреждений обсадных колонн, только в 30% отмечен факт подъема уровня тампонажного раствора выше места повреждения труб. Отсутствие цементного кольца против места повреждения обсадных колонн в большинстве случаев вызвано трудностью заполнения больших каверн и несолестойкостью цементов. Предполагаемая нами последовательность изменения реальных схем нагружения обсадных труб в условиях течения соляных пород следующая:

I вариант.

Один из концов обсадной колонны выше или ниже интервала дефор-

мирующихся пород не защемлен. Цементный камень в затрубном пространстве отсутствует. Сближаясь с обсадными трубами, стенки скважины (каверны) одновременно или неодновременно касаются их в нескольких точках. В результате концентрации напряжений в местах контакта, превышающей прочность соляных пород (это доказано нами расчетом и опытами) дальнейшее касание труб с породой будет происходить по некоторой поверхности. При достаточной сопротивляемости труб, возможна полная "запайка" их деформируемыми породами. Если прочность труб окажется недостаточной, они будут смяты (сплющены) контактным давлением пород при какой-то, наиболее опасной для труб, площади контакта с породой.

II Вариант.

Обсадная колонна закреплена выше и ниже интервала деформирующихся пород и расположена эксцентрично относительно оси скважины (каверны). Не имея возможности свободно прогибаться до касания с противоположной стенкой скважины (каверны), обсадная колонна будет испытывать одностороннее давление деформирующихся пород, результатом чего может быть местный поперечный изгиб колонны вплоть до ее разрыва. Но и при этом варианте нагружения труб, при определенном сочетании их жесткости и прочности со скоростью течения и реологическими свойствами пород, также вероятен частичный или всесторонний обхват труб деформируемыми породами.

Исходя из изложенной гипотезы о характере взаимодействия обсадных труб с деформируемыми породами, в план дальнейших исследований были включены следующие основные этапы:

I. Экспериментальное изучение связи между контактным давлением деформирующихся пород, их реологическими свойствами, скоростью деформации и размерами наружной поверхности обсадных труб, находящихся в контакте с породами.

2. Оценка сопротивляемости труб контактному давлению пород с учетом одновременного действия внутреннего и наружного гидравлических давлений для случая, когда один конец обсадной колонны не зашпелен (I вариант нагружения).

3. Разработка на базе двух первых этапов методики выбора параметров обсадных труб, необходимых для сопротивления неравномерному давлению по указанному варианту нагружения.

Следует заметить, что расчет обсадных труб при других, не рассматриваемых нами, схемах неравномерного нагружения также нуждается в предварительном решении вопросов первого этапа намеченных исследований.

Схематизация процесса взаимодействия обсадных труб с деформирующимися соляными породами в скважинах, как показано выше, приводит к задаче о поступательном движении твердого тела определенной формы в безграничном массиве. Для обоснования и возможного сокращения числа необходимых для эксперимента параметров, определяющих этот процесс, нами проведены опыты по оценке реологической модели соляных пород в широком диапазоне градиентов скорости их течения, при различных условиях напряженного состояния и температурах. Крайние значения исследованного диапазона скорости сдвига $10^{-10} < \dot{\gamma} < 10^{-4} \frac{1}{\text{сек}}$, были обеспечены при помощи опытов на ползучесть в условиях одноосного сжатия (эти опыты проведены автором совместно с В.С.Войтенко) и вдавливания шариков с постоянной скоростью, промежуточные - проведенными нами ранее испытаниями полых цилиндрических образцов в матрице. Опыты на ползучесть при одноосном сжатии длительностью от I до 6,5 месяцев проведены на специально оборудованном шестисекционном рычажном прессе при температурах образцов от комнатной до 200°C . Вдавливание шариков производилось в образцы, заключенные в специальную матрицу.

При отработке методики изготовления искусственных образцов каменной соли отмечены некоторые особенности, обычно не учитываемые при подобных испытаниях. Например, снижение временного сопротивления сжатию прессованных образцов при хранении (в 1,5 раза за 283 суток); некоторое возрастание и затем резкое падение прочности на сжатие с повышением температуры до 300°C, увеличение деформации до разрушения с ростом температуры от комнатной до указанной с 5 до 20%, различия в поведении под продолжительной постоянной нагрузкой рекристаллизованных и нерекристаллизованных образцов каменной соли, выраженные в особенностях развития деформации до установившейся в первые десятки суток и др.

Сравнение результатов испытаний на ползучесть при указанных условиях позволило сделать выводы о том, что предел ползучести соляных пород (физического смысла как некоторая константа данного материала не имеет и может быть выделен лишь условно, а их пластическая вязкость зависит от градиента скорости течения. Реологическую модель соляных пород в общем случае можно описать законом трения в виде:

$$\dot{\gamma} = \frac{(\tau - \tau_0)^n}{\eta}, \quad (III-2)$$

где τ - напряжение сдвига; τ_0 - условный (технологический) предел ползучести, зависящий от условий испытания (продолжительность опыта, точность замера деформаций, требования практических расчетов и др.).

n - показатель нелинейности, зависящий от температуры и состава соляных пород.

Скорость течения соляных пород в скважинах можно принять постоянной, что позволяет исключить время из числа определяющих параметров.

Из общих физических представлений о рассматриваемом процессе и опыта решения известных из гидродинамики задач по обтеканию шара или цилиндра вязкой и вязко-пластичной жидкостью, заполняющей все пространство вокруг них, внедрение обсадной трубы в соляной массив можно охарактеризовать функциональной зависимостью девяти параметров:

$$\Phi(W, d, h, \ell, V, \rho, \eta, \tau_0, t) = 0, \quad (\text{II-1})$$

где W - лобовое сопротивление трубы; d - ее диаметр, h - глубина внедрения; ℓ - длина контактной поверхности; V - скорость течения породы; ρ - плотность породы; t - время. Значения остальных параметров указаны выше.

Из анализа размерностей параметров функциональной зависимости (II-1), с учетом сделанных выше выводов относительно вязкости η и предела ползучести τ_0 соляных пород, позволивших объединить полученные при анализе параметры Рейнольдса и пластичности их обобщенным значением через среднюю эффективную вязкость η^* соляного потока в зоне контакта и принимая процесс стационарным, нами получены три безразмерных параметра, использованные при моделировании рассматриваемого явления:

$$Eu = \Phi(Re^*, h/d) \quad (\text{III-5})$$

Здесь: $Eu = \frac{W}{\rho V^2 d \ell}$ - параметр Эйлера; $Re^* = \frac{V d \rho}{\eta^*}$ - обобщенный параметр Рейнольдса, h/d - параметр, названный нами параметром внедрения.

Связь между указанными критериями подобия отыскивалась экспериментально следующим образом: в блоки соляных пород различного состава, плотности и температуры вдавливались с заданной скоростью цилиндры различного диаметра и длины.

По величине лобового сопротивления, глубине и средней скорости внедрения рассчитывали параметры: Re^* , Eu , h/d . Эффективную вязкость, необходимую для расчета Re^* , определяли, используя закон Стокса вдавливанием в идентичные образцы породы шариков при градиенте скорости, соответствующем таковому при вдавливании цилиндра. Градиент скорости течения определяли из соотношения $\dot{\gamma} = \frac{dV}{dS} = \frac{V}{S}$, где S - ширина зоны возмущения. Ее определяли по искривлению прямоугольной сетки, нанесенной на внутренние поверхности разрезанного перед вдавливанием образца соляной породы. Диаметр этой зоны оказался равным приблизительно трем диаметрам цилиндра независимо от его абсолютных размеров. Отсюда, $S = d$.

Исследованный диапазон значений обобщенного параметра Рейнольдса $10^{-18} < Re^* < 10^{-14}$ (по порядку величин) был задан ориентировочно, исходя из реальных скоростей течения соляных пород в скважинах, диаметров наиболее распространенных при креплении соленосных отложений обсадных труб и возможных изменений значений эффективной вязкости соляных пород.

Полученная эмпирическая зависимость между параметром Эйлера, обобщенным параметром Рейнольдса и параметром внедрения имеет следующий вид:

$$Eu = \frac{5\sqrt{2h/d}}{Re^*} \quad (\text{III-7})$$

Отсюда, подставив вместо Eu и Re^* их значения и заменив $2h/d = 1 - \cos\varphi$, где φ - половина центрального угла сектора, ограничивающего контактную поверхность трубы с породой, получили формулу для расчета удельного лобового сопротивления, названного нами далее контактным давлением соляных пород на трубы:

$$W_y = \frac{5\eta^* V}{d} \sqrt{1 - \cos\varphi} \quad (\text{III-8})$$

Длина участка соприкосновения труб с соляными породами, как следует из формулы (III-8), не влияет на величину их контактного давления на трубы. Последнее зависит от вязкости пород, скорости их течения, диаметра труб и угла их обхвата.

Допуская, что $\tau_d^* V = \eta^* \dot{\gamma} = \tau_{max} = K$, где K - пластическая "постоянная", определяемая опытами на одноосное сжатие, зависимость (III-8) можно легко использовать для оценки верхнего значения контактного давления в практических расчетах, когда скорость течения пород в скважине неизвестна.

Для точного расчета контактного давления применительно к реальным условиям, имеющим место в скважинах, необходимо знание эффективной вязкости и скорости течения рассматриваемой породы. Эффективную вязкость можно определить по описанной выше методике вдавливанием в керновый материал шариков или по известной для данных пород реологической кривой. Скорость течения соляных пород в скважинах можно оценить приблизительно несколькими последовательными замерами их диаметра каверномером (профилемером), расчетом или моделированием напряженного состояния приствольной зоны скважины в специальной установке, например, как это сделано Г.А.Стрельцом, А.Н.Переясловым и др.

Экспериментальные исследования по оценке реологической модели соляных пород и изменения контактного давления при обхвате ими трубы, показавшие, что соляные породы в состоянии ползучести приближаются по свойствам к неньютоновской вязкости, позволили предположить, что в секторе обхвата трубы они могут обеспечить распределение давления, близкое к гидравлическому. Это послужило основой для некоторой идеализации расчетной схемы нагружения труб в соответствии с поставленными задачами.

При выводе формулы "сминающего" контактного давления использовано решение Ю.А. Шиманского задачи об изгибе равностенного круглого кольца единичной длины от действия на него сосредоточенной внешней силы и метод наложения. Результирующая формула имеет следующий вид:

$$p = \frac{K [2Kb_T - (p_H - p_B)]}{3/\pi (\pi \sin \varphi - 2\varphi) + K \sin \varphi} \quad (IV-7)$$

Здесь: p - контактное давление, при котором появляются первые признаки остаточной деформации кольца (начало отклонения зависимости деформации от давления от линейной). Это давление в дальнейшем условно названо нами сминающим.

$K = \delta/d_c$; δ, d_c - толщина стенки кольца и его средний диаметр; p_H, p_B - наружное и внутреннее гидравлические давления; φ - угол обхвата кольца породой.

Для проверки справедливости зависимости (IV-7), применительно к случаю нагружения колец соляными породами, нами проведены опыты по нагружению колец наружным диаметром 65 и 60,3 мм из сталей с пределами текучести при растяжении от 41,6 кгс/мм² до 55 кгс/мм². С диапазоном изменения коэффициента стенности колец в опытах $0,035 \leq K \leq 0,0864$ по следующей методике.

В кернах, а также изготовленных методом прессования образцах каменной соли, помещенных в стальную матрицу, позволяющую нагревать образцы, выдавливали или выфрезеровывали гнезда различной глубины с радиусом кривизны, равным наружному радиусу испытываемых колец. В эти гнезда вставляли кольца и нагружали их при помощи гидравлического пресса. Контактное давление на кольца рассчитывали по формуле $p = \frac{P}{F}$, где P - усилие пресса; F - фронтальная площадь

контакта кольца с соляным блоком. Изменение диаметров кольца фиксировали при помощи индикаторов часового типа ИЧ-10.

Проведены также опыты по оценке влияния длины свободных концов труб (расположенных за пределами участка, воспринимающего контактное давление) на величину сминающего контактного давления р. С этой целью измеряли деформацию кольцевых сечений труб различной длины при постоянной длине участка неравномерного их нагружения при помощи тензодатчиков и рассчитывали величину сминающего контактного давления. Установили, что сминающее давление труб с параметром $0,035 \leq K \leq 0,0844$ при длине свободных концов, равной или большей шести диаметров труб, увеличивается в 1,5 раза по сравнению с прочностью колец, нагруженных по всей длине. Размеры установки для опытов выбраны с учетом этого обстоятельства.

Основной частью установки является толстостенный цилиндрический корпус, внутри которого можно изолировать и центрировать при помощи уплотнительных узлов и посадочных отверстий торцевых фланцев испытываемую трубу диаметром 60,3 мм.

Контактное сминающее давление в средней части трубы передается через металлические плашки и связанные с ними штоки от плит гидравлического пресса. Штоки могут перемещаться в направлении, перпендикулярном образующей цилиндрической поверхности трубы. С ними жестко связаны индикаторы часового типа для контроля за деформацией трубы. Одновременно с контактным, можно создавать гидравлическое давление на наружную и внутреннюю поверхности трубы.

Опытная зависимость сминающего контактного давления колец от угла обхвата φ подобна теоретической по формуле (IV-7), совпадает по минимуму сминающего давления, но сдвинута приблизительно на 17° в сторону меньших значений углов φ . Это обстоятельство можно объяснить неучтенным формулой (IV-7) "поддеживающим" дейст-

нием твердого тела, передающего контактное давление. "Поддержка" появляется за счет действия касательных сил по поверхности контакта, сдерживающих деформацию кольца.

Эмпирическая зависимость минимального сминающего контактного давления колец от их геометрических и прочностных параметров удовлетворительно описываются формулой:

$$p = 11 \sigma_T K^{2,5} \quad (IV-10)$$

Отличительной особенностью процесса смятия колец (труб) контактным давлением, передаваемым твердым телом, от смятия в жидкой среде является то, что развитие деформации колец (труб) почти до 3% в первом случае требует постоянного повышения контактного давления. В противном случае, начавшаяся деформация затухает, если давление оставить на достигнутом уровне.

Указанное обстоятельство, на наш взгляд, следует учитывать при расчете сминающего давления, так как некоторую деформацию обсадных труб в большинстве случаев можно допустить. Сминающее давление в этом случае возрастает с увеличением угла обхвата по следующей зависимости:

$$p_T = 2 p (1 - 0,1 \varphi) \quad (IV-11)$$

Здесь: p_T - контактное давление, при котором начинается прогрессирующая деформация колец (труб); φ - в радианах.

Влияние гидравлического давления на величину контактного сминающего давления соответствует теоретической формуле (IV-7) т.е. наружное гидравлическое давление снижает, а внутреннее - повышает сопротивляемость труб смятию контактным давлением. Однако степень этого влияния незначительна. С развитием деформации трубы степень влияния внутреннего гидравлического давления несколько возрастает.

Осевое растяжение труб также снижает их прочность на смятие, как и в случае с гидравлическим нагружением и может быть учтено при помощи формулы, предложенной, например, А.А.Гайворонским для случая двухосного нагружения труб.

Утолщение стенок труб, с целью увеличения их сопротивляемости неравномерному давлению, более эффективно, чем увеличение предела текучести стали, из которой они изготовлены. Увеличить сопротивляемость труб неравномерному давлению пород можно также уменьшением их диаметра. Например, при рассматриваемой схеме неравномерного нагружения, прочность 146мм. обсадных труб из стали группы прочности "К" с толщиной стенок 11 мм, будет равна прочности 219 мм обсадных труб из этой же стали только в том случае, если толщина стенок последних будет в 1,5 раза больше или, при той же толщине стенок, предел текучести их стали будет выше в 3,4 раза.

Минимальная прочность труб при рассмотренной схеме неравномерного нагружения достигается при угле обхвата $\varphi = 50^\circ$.

Характер изменения зависимости сминающего контактного давления труб с увеличением угла обхвата показывает, что если обсадные трубы каким-то образом "поддержат" до того момента, когда угол φ будет таким, при котором сопротивляемость труб будет сопоставима с их сопротивляемостью при равномерной схеме нагружения ($70-80^\circ$) то убрав "поддержку" в дальнейшем можно не опасаться, что они будут повреждены давлением деформирующихся пород при заполнении ими затрубного пространства скважины.

В этом случае обсадные трубы было бы достаточно рассчитать на смятие равномерным геостатическим давлением и, тем самым, намного уменьшить требования к их соответствующим параметрам.

Для оценки реальности такой возможности нами проведены опыты по смятию колец с зацементированным внутренним пространством. При

временном сопротивлении цементного камня одноосному сжатию $0,8 \text{ кгс/мм}^2$, сминающее давление колец с зацементированным внутренним пространством увеличивается в 3-4 раза (большая кратность увеличения относится к трубам с меньшей толщиной стенок и большего диаметра).

Данное мероприятие может обеспечить временную равнопрочность обсадных труб при неравномерной и равномерной схемах их нагружения без увеличения толщины стенок труб. Опыт крепления скважин № 10 - Монастырше, № 4 - Августовка, № 1 - Иваница и № 1 - Черняховская треста "Черниговнефтегазразведка" в отложениях калийно-магниевых солей показал, что его можно использовать в случае легкодеформируемых пластов пород небольшой мощности.

Цементные мосты в обсадных колоннах против интервалов деформирующихся пород устанавливали в процессе их цементирования и разбуривали через 7-12 суток - время, достаточное для полного обхвата труб породой, рассчитанное исходя из скорости течения последней и размеров каверны.

Для выбора параметров обсадных труб, необходимых для оказания должного сопротивления неравномерному давлению деформирующихся горных пород, нужно величину контактного давления W_y сравнить с прочностью обсадных труб, оцениваемой величиной p .

В соответствии с условием минимума сминающего давления по рассмотренной схеме неравномерного нагружения обсадных труб, их прочность следует рассчитывать по формуле:

$$p_{\min} = \frac{K [2Kb_T - (P_H - P_B)] C}{0,63 + 0,77 K} \quad (У-1)$$

где $C = (0,85 + 0,95)$ - коэффициент, учитывающий снижение сопротивляемости труб сжатию от действия растягивающих сил (например, от собственного веса обсадной колонны). Можно пользоваться также эмпирической зависимостью (1У-10) или графиком, ей соответствующим.

шим. подбирая параметры труб K и $\bar{\sigma}_T$, удовлетворяющие условию

$W_y \leq \rho_{min}$, можно определить необходимую толщину стенок труб и группу прочности стали.

Для расчета контактного давления W_y , соответствующего самому неблагоприятному для труб углу обхвата их деформируемыми породами, можно пользоваться формулой:

$$W_y = 3 K, \quad (У-3)$$

где $K = \frac{\sigma_{сж}}{2}$; $\sigma_{сж}$ - временное сопротивление породы одноосному сжатию; или формулой:

$$W_y = \frac{3 V \eta^*}{d}, \quad (У-4)$$

параметры которой определять согласно методике, изложенной выше.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ повреждений обсадных колонн, перекрывающих интервалы скважин, осложненные течением соляных или глинистых пород, показывает, что во многих случаях в этих интервалах со временем происходит деформация труб, рассчитанных по существующим методикам даже на полное геостатическое давление из предположения о равномерном его распределении по периметру труб.

2. Наиболее опасными напряжениями, возникающими в стенках обсадных труб при взаимодействии их с деформируемыми горными породами, являются напряжения от контактного давления пород, распределенного лишь по части периметра наружной поверхности труб.

3. Величина контактного давления соляных и глинистых пород на обсадные трубы зависит от скорости их течения, вязкости, диаметра труб, площади контакта труб с породой и может быть определена

для каждого конкретного случая по предложенным в настоящей работе формулам.

4. Для варианта неравномерного нагружения обсадных труб, предусматривающего возможность их некоторого перемещения в осевом направлении (один конец не заземлен) предложена проверенная экспериментально формула, которая может быть использована в практических расчетах.

5. Внутриколонное гидравлическое давление малоэффективно в части увеличения сопротивляемости обсадных труб неравномерному давлению деформирующихся пород и не может служить надежным мероприятием, предотвращающим повреждение труб контактным давлением пород в реальных условиях. Наружное гидравлическое давление способствует деформации труб под действием неравномерного давления пород.

6. Выбор параметров обсадных труб, необходимых для крепления интервалов скважин, опасных с точки зрения возможного неравномерного нагружения труб деформируемыми породами, можно производить по изложенной в диссертации методике.

7. Применение при креплении пластичных пород высокопрочных толстостенных обсадных труб в некоторых случаях (легкодеформируемые пласты малой мощности) можно исключить временным упрочнением обсадных труб, рассчитанных только на равномерное геостатическое давление, посредством установки внутри них удаляемых впоследствии цементных мостов.

Результаты работы докладывались автором на Всесоюзном совещании по вопросам бурения и крепления скважин в соленосных отложениях (г.Саратов, 1969г), на Всесоюзном совещании по вопросам бурения и крепления скважин в соленосных отложениях (г.Актюбинск, 1970г.), на Всесоюзной научной конференции по вопросам повышения эффективности разведочного бурения (г.Алма-Ата, 1971г.).

Основные положения диссертации опубликованы
в следующих статьях:

1. Пластическое течение солей в скважинах. "Нефтяное хозяйство" № 12, 1968г. (совместно с Б.С.Филатовым, Г.А.Стрельцом, В.З.Лубаном).
2. Опыт проводки скважин в соляных отложениях при наличии пластов бишофита. "Нефтяная и газовая промышленность", № 1, 1969г. (совместно с Г.А.Стрельцом, В.З.Лубаном, Н.Х.Титаренко).
3. О креплении скважин в интервалах залегания бишофита. Труды I Украинской научно-технической конференции по термо и солеустойчивым промывочным жидкостям и тампонажным растворам. Изд. "Наукова Думка", Киев, 1970г.
4. Нарушения обсадных колонн в соленосных отложениях. "Нефтяное хозяйство" № 2, 1970г. (совместно с Г.А.Стрельцом, Б.С.Филатовым, В.З.Лубаном).
5. Предупреждение смятия обсадных колонн в соленосных отложениях. Материалы Всесоюзного совещания по бурению в солях, г.Саратов, 1970г. (совместно с В.З.Лубаном, Г.А.Стрельцом).
6. Анализ повреждений обсадных колонн в хемогенных породах. со.Повышение эффективности разведочного бурения. Расширенные тезисы докладов Всесоюзной научной конференции. г.Алма-Ата, 1971г.
7. О наружном давлении на обсадные трубы в соляных породах. Труды ИИИИП имени И.М.Гускина, сб. "Нефть и газ", М., 1972г.
8. О сопротивляемости обсадных труб неравномерному сминающему давлению соляных пород. "Нефтяное хозяйство", №1, 1974г. (совместно с Б.Г.Леоновым, Б.С.Филатовым).

Л 53900 от 27.11.74 года Заказ 46 тираж 150 экз.

Ротапринтная ВНИИГТ