

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Хлопцов Дмитрий Валерьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СКВАЖИН ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА
В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ О СВОЙСТВАХ И
НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ МАССИВА**

Специальность – 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор физ.-мат. наук, Винников В.А.

Москва 2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Подземные хранилища газа (ПХГ) играют чрезвычайно важную роль в обеспечении энергетической безопасности страны, во многом решая проблемы, связанные с неравномерным потреблением газа, удалённостью его месторождений от потребителей, возможным возникновением чрезвычайных ситуаций в газотранспортной инфраструктуре и т.д., Поскольку ПХГ представляет собой сложную природно-техническую систему, то её надёжность будет зависеть от надёжности всех составляющих её элементов. Одними из наиболее уязвимых из них являются эксплуатационные скважины, на устойчивость которых влияет широкий спектр горно-геологических и горно-технических факторов. Именно поэтому прогноз их состояния является необходимым условием экономически эффективной, экологически и технологически безопасной эксплуатации искусственно создаваемых в геологических структурах резервуаров. Надёжность такого прогноза определяется, прежде всего, качеством информации о строении вмещающего массива и его напряжённо-деформированном состоянии, свойствах слагающих массив горных пород и их динамике в процессе эксплуатации ПХГ. В силу принципиальной разномасштабной неоднородности породного массива, а также экономических и технологических ограничений при получении указанной информации, она всегда носит ограниченный и вероятностный характер, что неизбежно сказывается на качестве прогноза и требует обоснования новых методических подходов его реализации. В связи с изложенным представляется актуальной задача разработки метода прогнозирования устойчивости эксплуатационных скважин подземных хранилищ газа в условиях ограниченной информации о свойствах и состоянии вмещающего её породного массива.

Целью работы является повышение надёжности прогноза устойчивости эксплуатационных скважин подземных хранилищ газа в условиях недостаточной информации о свойствах и напряжённом состоянии массива.

Основная идея работы состоит в использовании методов статистического моделирования для определения наиболее вероятных сочетаний свойств и состояния массива, приводящих к возникновению критических состояний элементов конструкции скважин, с целью недопущения указанных состояний на стадиях строительства и эксплуатации скважин.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих исследований, посвященных обеспечению устойчивости эксплуатационных скважин подземных хранилищ газа на этапе их строительства и дальнейшей эксплуатации, а также проанализировать исследования прогноза устойчивости скважин на этих этапах.
2. На основании изучения геомеханических процессов в прискважинной области массива во время строительства эксплуатационных скважин подземных хранилищ газа с учетом влияния прочностных свойств прискважинного массива, начального напряженного состояния вмещающих скважину горных пород и температурных напряжений, определить условия возникновения критических состояний открытого ствола скважин при бурении.
3. Определить условия возникновения критических состояний крепи эксплуатационных скважин подземных хранилищ газа, состоящей из обсадной колонны и цементного кольца, обусловленных геомеханическими процессами и внутритрубным давлением с учетом влияния механических свойств и состояния породного массива, а также конструктивных параметров крепи.
4. Оценить влияние случайных изменений свойств и состояния массива, конструктивных параметров скважин на возникновение критических состояний конструкции скважины по результатам имитационного моделирования.
5. Разработать метод прогнозирования устойчивости эксплуатационных скважин подземных хранилищ газа в условиях ограниченной информации о свойствах и напряженном состоянии массива.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Существует диапазон плотностей бурового раствора, при котором невозможно наступление критического состояния открытого ствола эксплуатационной скважины подземного хранилища газа. При этом указанный диапазон зависит от прочностных свойств пород в прискважинной области, пластового давления, начального напряженного состояния породного массива и технологических особенностей строительства.
2. Предельные значения глубины, на которой не наступает критическое состояние крепи скважин определяется давлением горных пород на крепь скважины с учетом замещения буферной жидкости цементным раствором и временем с момента вступления крепи в работу. Кроме того, от давления горных пород на крепь скважины зависят условия разрушения обсадной колонны и цементного кольца из-за избыточного

внутреннего давления в скважине при испытаниях и эксплуатации эксплуатационных скважин подземных хранилищ газа.

3. С помощью имитационного моделирования были получены диапазоны плотностей бурового раствора, при которых обеспечивается устойчивость открытого ствола скважины, предельные величины избыточных внутреннего и внешнего давлений для различных типоразмеров обсадных колонн и скважин, в пределах которых обеспечивается устойчивость обсадной колонны и цементного камня.

Методология и методы исследования: анализ и обобщение научно-технической информации; математическое и компьютерное моделирование геомеханических процессов, протекающих при строительстве и креплении скважин; натурные исследования при строительстве скважин по определению давления горных пород на стенки скважин.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- использованием апробированных методов геомеханики и механики подземных сооружений, методов статистического анализа, сертифицированных программных комплексов численного моделирования;
- сходимостью полученных результатов с результатами исследований других авторов, полученных, в частности, в ходе строительства и эксплуатации скважин подземных хранилищ газа;
- положительными результатами внедрения расчетных рекомендаций в практику проектирования и строительства скважин.

Научная новизна работы:

- с учетом прочностных свойств пород в прискважинной области, пластового давления, начального напряженного состояния породного массива и технологических особенностей строительства получена количественная оценка диапазона плотностей бурового раствора, при которых не наступают критические состояния открытого ствола скважин, обусловленные геомеханическими процессами;
- с учетом полученного аналитического выражения временной зависимости величины давления горных пород на крепь скважины установлены предельные значения глубин, при которых может наступать критическое состояние обсадной колонны;
- по результатам имитационного моделирования определены наиболее вероятные сочетания свойств и состояния массива, приводящих к

возникновению критических состояний элементов конструкции скважин.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- предложены и обоснованы зависимости для определения границ допустимой плотности бурового раствора при строительстве скважин, учитывающие различные горно-геологические и технологические условия;

- предложены и обоснованы зависимости для определения критических состояний конструкций крепи скважин в различных горно-геологических условиях;

- разработаны рекомендации по количественной оценке устойчивости открытого ствола скважины с учетом различных горно-геологических и технологических факторов;

- разработаны рекомендации по количественной оценке устойчивости конструкций крепи скважин;

- разработаны рекомендации по оценке влияния неопределенности свойств горных пород, вмещающих скважину, и технологических факторов, влияющих на ее устойчивость как в процессе ее строительства, так и эксплуатации.

Реализация выводов и рекомендаций работы: разработанные рекомендации по количественной оценке устойчивости открытого ствола скважины с учетом различных горно-геологических и технологических факторов, рекомендации по количественной оценке устойчивости конструкций крепи скважин и рекомендации по оценке влияния неопределенности свойств горных пород, вмещающих скважину, и технологических факторов, влияющих на устойчивость скважины как в процессе ее строительства и эксплуатации приняты к использованию в ООО «Газпром геотехнологии».

Апробация работы:

Основные положения диссертационной работы докладывались на Международных симпозиумах «Неделя горняка» (2017-2019 гг.), 72-й международной молодежной конференции «Нефть и газ – 2018», на конференции совета молодых ученых и специалистов ООО «Газпром геотехнологии» (2018 г.), на IX молодежной научно-практической конференции «Магистраль – 2019: Инициатива. Развитие. Потенциал» (2019), XIII Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика)» (2019), на заседаниях кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 5 статей, включая 3 в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ, две из которых входят в библиографическую базу данных Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 24 таблицы, 36 рисунков, список литературы из 82 наименований.

Автор выражает благодарность преподавательскому составу кафедры ФизГео и лично Шкуратнику Владимиру Лазаревичу за поддержку, ценные замечания и научно-методические консультации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Основным сооружением, необходимым для строительства подземных хранилищ нефти и газа, является эксплуатационная скважина. Эксплуатационная скважина представляет собой ответственное и дорогостоящее инженерное сооружение, связывающее земную поверхность с пластом-коллектором при разработке газонефтяных месторождений или подземном хранении газа в пористых структурах, с выработкой-емкостью при подземном хранении газонефтепродуктов в каменной соли. Поэтому обеспечение ее устойчивости является одной из важнейших научно-технических задач, решаемых при нефте- и газодобыче и подземном хранении.

В *первой главе* анализируется современное состояние исследований в области обеспечения устойчивости скважин как на этапе их строительства, так и во время эксплуатации нефтяных, газовых и нефтегазовых месторождений, а также подземных хранилищ газа. Кроме того, рассматривается современный уровень развития статистического моделирования и исследований по учету неопределенности при оценке устойчивости скважин.

Во *второй главе* приводится геомеханическое обоснование критических состояний открытого ствола скважин и даются методические рекомендации по количественной оценке устойчивости скважин в зависимости от различных горно-геологических и технологических условий.

Для этого основные виды осложнений при бурении скважин, обусловленные критическими состояниями на их стенках, были оценены с точки зрения геомеханики.

В ходе оценки был проведен сравнительный анализ использования условий предельного состояния в инвариантах напряжений и в виде огибающей предельных кругов Мора, который показал что учет среднего напряжения при оценке устойчивости открытого ствола скважины существенно расширяет

интервал устойчивого состояния стенок скважины, определяемый минимальной и максимальной величинами плотности бурового раствора. В связи с этим, целесообразно использовать расчетные выражения, полученные из условия предельного состояния в инвариантах напряжений (1) для рыхлых и слабосцементированных пород типа песков, а также пластичных пород типа глин, и (2) для связных пород типа песчаников, аргиллитов, алевролитов, солей:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{min} &= \lambda - \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot (1-\lambda) - \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{6 \cdot \cos \delta}{3 - \sin \delta} \cdot \left(\frac{k}{\gamma h} + \frac{1}{3}\right) \cdot (1+2\lambda) \cdot \operatorname{tg} \delta \\ \left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{max} &= \lambda + \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot (1-\lambda) + \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{6 \cdot \cos \delta}{3 - \sin \delta} \cdot \left(\frac{k}{\gamma h} + \frac{1}{3}\right) \cdot (1+2\lambda) \cdot \operatorname{tg} \delta \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{min} &= \lambda - \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot (1-\lambda) - \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{6 \cdot \cos \delta}{3 - \sin \delta} \cdot \left(\frac{\sigma_{сж}}{\gamma h} \cdot \frac{1 - \sin \delta}{2 \cdot \cos \delta} + \frac{1}{3}\right) \cdot (1+2\lambda) \cdot \operatorname{tg} \delta \\ \left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{max} &= \lambda + \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot (1-\lambda) + \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{6 \cdot \cos \delta}{3 - \sin \delta} \cdot \left(\frac{\sigma_{сж}}{\gamma h} \cdot \frac{1 - \sin \delta}{2 \cdot \cos \delta} + \frac{1}{3}\right) \cdot (1+2\lambda) \cdot \operatorname{tg} \delta \end{aligned} \quad (2)$$

Для оценки влияния свойств и состояния вмещающих пород на формирование критических состояний открытого ствола скважин были проанализированы полученные выражения (1) и (2).

Из анализа следует, что критические состояния породных стенок скважин зависят от следующих факторов:

- прочностных свойств пород в прискважинной области, характеризующихся коэффициентом сцепления k (пределом прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$) и углом внутреннего трения δ ;
- начального напряженного состояния породного массива, характеризующегося вертикальным начальным напряжением γh и коэффициентом бокового распора λ .

Влияние перечисленных факторов на устойчивость скважин и их критические состояния при выполнении буровых работ было последовательно оценено в ходе анализа наиболее простой ситуации: вертикальная скважина пройдена в однородном породном массиве с гидростатическим полем начальных напряжений ($\lambda = 1$), сложенным породами с близким к нулю относительным коэффициентом сцепления ($k/\gamma h \approx 0$).

Были получены зависимости предельных плотностей бурового раствора для различных углов внутреннего трения (рисунок 1), для различных значений коэффициента сцепления горных пород (рисунок 2) и коэффициента бокового распора (рисунок 3).

Кроме того, была произведена оценка влияния пластового давления на устойчивость открытого ствола скважин, которая показала, что наличие пластового давления при бурении скважин в водонасыщенных породах повышает устойчивость стенок в отношении возникновения сдвигового

разрушения пород, что выражается в уменьшении минимально допустимой плотности бурового раствора. В то же время, в этих условиях снижается увеличивается риск реализации другого механизма разрушения стенок – в результате возникновения трещин гидроразрыва, о чем свидетельствует снижение максимальной плотности бурового раствора. Для определения критических плотностей бурового раствора в условиях наличия пластового давления используются формулы (3) и (4), в которых ω - коэффициент, учитывающий степень воздействия пластового давления на скелет породы.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{min} &= \lambda - \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot (1-\lambda) - \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{6 \cdot \cos \delta}{3-\sin \delta} \cdot \left(\frac{k}{\gamma h} + \frac{1}{3} \cdot (1+2\lambda) \cdot tg \delta\right) - \omega \cdot \frac{p_{пл}}{\gamma h} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{6 \sin \delta}{3-\sin \delta}\right) \\ \left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{max} &= \lambda + \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot (1-\lambda) + \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{6 \cdot \cos \delta}{3-\sin \delta} \cdot \left(\frac{k}{\gamma h} + \frac{1}{3} \cdot (1+2\lambda) \cdot tg \delta\right) - \omega \cdot \frac{p_{пл}}{\gamma h} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{6 \sin \delta}{3-\sin \delta}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{min} &= \lambda - \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot (1-\lambda) - \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{6 \cdot \cos \delta}{3-\sin \delta} \cdot \left(\frac{\sigma_{сж}}{\gamma h} \cdot \frac{1-\sin \delta}{2 \cdot \cos \delta} + \frac{1}{3} \cdot (1+2\lambda) \cdot tg \delta\right) - \omega \cdot \frac{p_{пл}}{\gamma h} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{6 \sin \delta}{3-\sin \delta}\right) \\ \left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{max} &= \lambda + \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot (1-\lambda) + \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{6 \cdot \cos \delta}{3-\sin \delta} \cdot \left(\frac{\sigma_{сж}}{\gamma h} \cdot \frac{1-\sin \delta}{2 \cdot \cos \delta} + \frac{1}{3} \cdot (1+2\lambda) \cdot tg \delta\right) - \omega \cdot \frac{p_{пл}}{\gamma h} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{6 \sin \delta}{3-\sin \delta}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

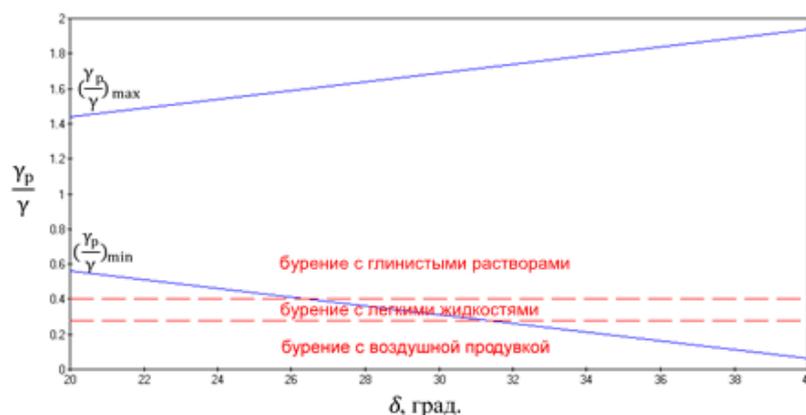


Рисунок 1 – зависимость величины относительного удельного веса бурового раствора от угла внутреннего трения горных пород

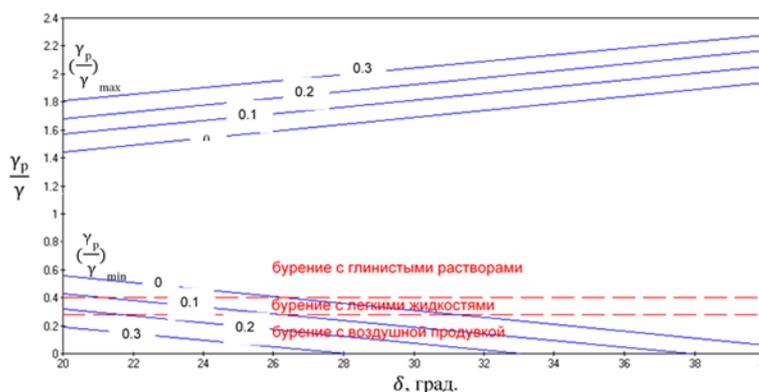


Рисунок 2 - Влияние коэффициента сцепления горных пород (значения указаны на графиках) на максимальную и минимальную величины относительного удельного веса бурового раствора при коэффициенте бокового распора равном 1

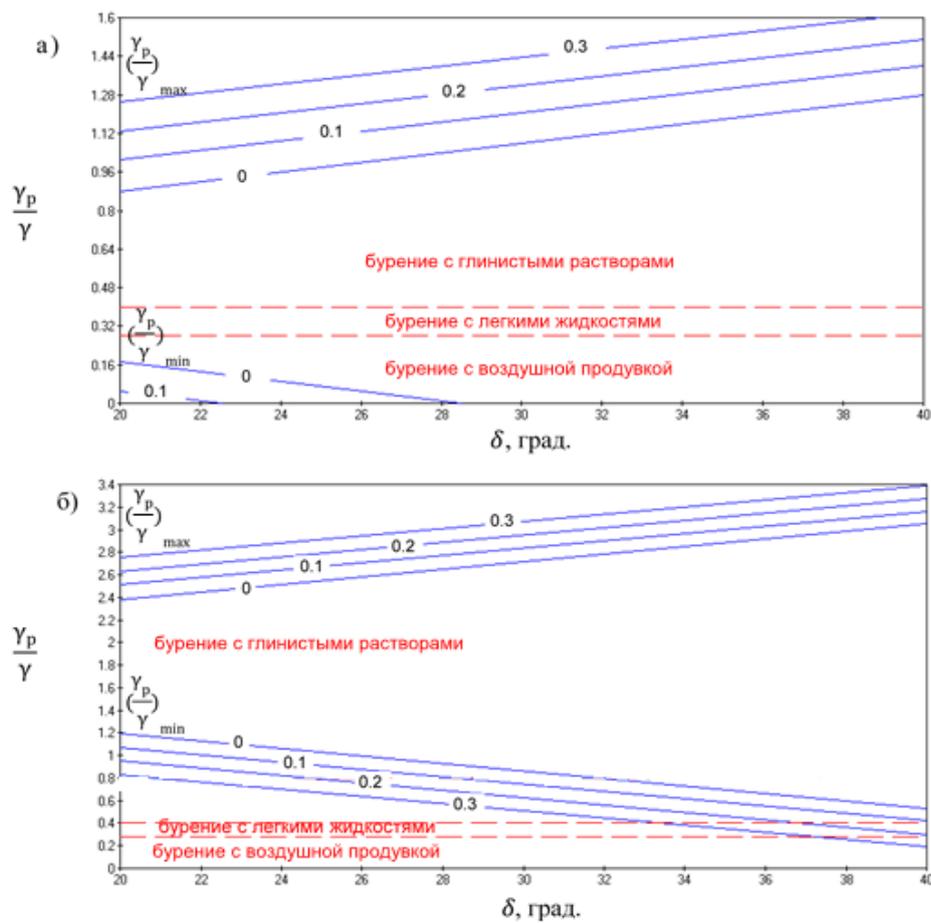


Рисунок 3 - зависимости критических значений относительного удельного веса бурового раствора от значений коэффициента бокового распора: а) 0.7, б) 1.5

Выполненные количественные оценки влияния перепада температур на устойчивость открытого ствола скважин показало, что снижение устойчивости стенок скважин при их охлаждении в результате циркуляции бурового раствора наиболее интенсивно проявляется в прочных и жестких породах (ангидриты), и не проявляется в породах с низкими прочностью и жесткостью (глины, пески).

Циркуляция бурового раствора приводит к охлаждению горных пород на стенках скважины вблизи ее забоя и, как следствие, к снижению их устойчивости, что выражается в увеличению минимальной и уменьшению максимальной плотностей бурового раствора. Снижение устойчивости стенок скважины наиболее интенсивно проявляется в прочных и жестких породах (III – IX категории буримости), и не проявляется в породах с низкими прочностью и жесткостью (I – II категории буримости). Величины увеличения минимальной и снижения максимальной плотностей бурового раствора для прочных и жестких пород могут быть определены по формуле (5) для пород III – IV

категорий и (6) для пород V – IX категорий, где: $T = T_3 - T_0 < 0$; T_3 – температура пород на забое, определяемая по формуле (7); T_0 – начальная температура пород.

$$\Delta\left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{min}^{max} \approx \pm 0.006 \cdot T \quad (5)$$

$$\Delta\left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{min}^{max} \approx \pm 0.03 \cdot T \quad (6)$$

$$T_3 = 0.33T_0 + 0.67T_{II} \quad (7)$$

Горизонтальная скважина является менее устойчивой по сравнению с вертикальной, о чем свидетельствуют намного большие величины минимальной плотности бурового раствора, обеспечивающей деформирование пород в приконтурной области в допредельной стадии.

Анализ полученных при расчетах данных показал, что максимальная плотность бурового раствора $\left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{max}$, обеспечивающая устойчивость открытого ствола скважины, одинакова как для вертикального, так и для горизонтального участков скважины. Таким образом, для определения максимальной плотности бурового раствора при бурении горизонтальной скважины можно использовать соответствующие выражения (1) и (2). Для определения минимальной плотности рекомендуется использовать значения, приведенные в таблице 1.

В третьей главе рассматриваются и анализируются критические состояния крепи скважин. Основными нагрузками, которые испытывают скважины в период обустройства скважины (спуска обсадных колонн и их цементирования) и ее эксплуатации являются:

- растягивающие усилия от собственного веса труб;
- избыточное наружное давление;
- избыточное внутреннее давление.

Наружное давление на обсадную колонну создается силами горного давления, а также гидростатическим давлением буферной жидкости в нецементируемом интервале скважины. Наибольшую опасность представляет давление на обсадную колонну, создаваемое вмещающими горными породами и передаваемое на колонну либо через цементный камень, либо непосредственно при отсутствии цемента в интервале залегания неустойчивых пород. Наиболее распространенными повреждениями от избыточного наружного давления являются их смятие и потеря герметичности труб в местах их соединений.

Избыточное внутреннее давление на обсадную колонну возникает, как правило, при опрессовке колонны, а также при эксплуатации скважины в

условиях аномально высоких пластовых давлений (АВПД), когда внутреннее давление превышает наружное давление на колонну. Разрушение колонн по телу трубы от избыточного внутреннего давления при отсутствии внутренних дефектов в трубе маловероятно, поэтому наиболее вероятной является потеря герметичности труб в местах их соединений.

Таблица 1 – Критические плотности бурового раствора для горизонтальной скважины

$(\gamma_p/\gamma)_{min}$				
$\lambda = 0.5$				
δ , град.	$k/\gamma h$			
	0	0.1	0.2	0.3
20	0.4	0.27	0.14	0.01
25	0.32	0.19	0.06	0
30	0.23	0.11	0	0
35	0.14	0.04	0	0
40	0.06	0	0	0
$\lambda = 0.7$				
δ , град.	$k/\gamma h$			
	0	0.1	0.2	0.3
20	0.45	0.32	0.20	0.07
25	0.36	0.23	0.11	0
30	0.25	0.13	0.02	0
35	0.16	0.04	0	0
40	0.07	0	0	0
$\lambda = 0.85$				
δ , град.	$k/\gamma h$			
	0	0.1	0.2	0.3
20	0.50	0.37	0.25	0.12
25	0.39	0.26	0.14	0.003
30	0.28	0.15	0.03	0
35	0.17	0.04	0	0
40	0.06	0	0	0

Основной причиной возникновения критического состояния цементного кольца в затрубном пространстве обсадной колонны, которое выражается в потере им герметичности, является избыточное внутреннее давление в скважине, которое возникает при опрессовке цементного кольца или в условиях АВПД. Потеря герметичности цементного кольца обусловлена силовыми факторами, действующими на стенки и крепь скважины при опрессовке или в условиях АВПД.

Превышение давления флюида в скважине над реактивным отпором, создающимся вмещающими горными породами, создает условия для возникновения вертикальных микротрещин от «башмака» обсадной колонны до устья скважины вследствие нарушения сцепления, прежде всего по контакту цемент/порода.

Из анализа критических состояний крепи скважин следует вывод о том, что важнейшим фактором в формировании условий наступления их критических состояний является давление горных пород. С одной стороны, давление горных пород является причиной возникновения избыточного наружного давления на крепь, с другой стороны, давление горных пород создает реактивный отпор при избыточном внутреннем давлении в скважине.

Для определения давления горных пород на крепь скважины было получено уравнение:

$$\frac{p_{кр}}{\lambda\gamma h} = 1 - \frac{1-k_3 \frac{\gamma_{ц}}{\gamma} - (1-k_3) \frac{\gamma_6}{\gamma}}{1 + \frac{\delta}{1-\alpha} t^{1-\alpha}} \quad (8)$$

Данное уравнение учитывает последовательность приложения отдельных видов нагрузки к массиву, т.е. учитывает, что к моменту ввода крепи в работу в сечениях, где она установлена, успевают развиваться смещения стенок выработки. После того, как крепь введена в работу, она начинает препятствовать смещению стенок. В общем случае эти смещения продолжают нарастать, так как крепь имеет определенную податливость. Выполненные расчеты и их сопоставление с результатами испытаний скважины на герметичность показывают хорошую сходимость расчетных и фактических величин давлений горных пород на крепь скважины, что говорит об адекватности предложенного подхода к их оценке и справедливости формулы (8), несмотря на ее приближенный характер.

Смятие обсадных колонн обусловлено избыточным внешним давлением на крепь скважины, создаваемым вмещающими горными породами. Глубины, при которых следует ожидать наступления критического состояния крепи скважины можно определить из условия смятия обсадной колонны:

$$h \geq \frac{1}{\psi_1^{int}} \cdot \frac{\sigma_T}{\lambda\gamma}, \quad (9)$$

где σ_T – предел текучести стали, МПа; $\gamma = \rho \cdot 9.81 \cdot 10^{-6}$, ρ – средняя плотность вышележащих пород, кг/м³; λ – коэффициент бокового распора, принимаемый равным: для рыхлых несвязных пород типа влажных песков $\lambda \approx 0.5$; для твердых связных пород типа песчаников, известняков, аргиллитов, алевролитов и доломитов $\lambda \approx 0.7$; для пластичных и склонных к ползучести пород типа глин и солей $\lambda \approx 1$; ψ_1^{int} – геометрический параметр (табличное значение).

Критические состояния крепи скважины из условия потери герметичности элементов крепи возможны вследствие избыточного внутреннего (внутритрубного) давлений.

Избыточное внутреннее давление, приводящее к разрушению обсадной колонны по телу трубы, определяется из следующего предельного соотношения:

$$p_{вт} \geq \frac{\sigma_T + \chi_1^{отп} \cdot p_{кр}}{\chi_1}, \quad (10)$$

в котором коэффициенты концентрации напряжений χ_1 и $\chi_1^{отп}$ принимаются по таблицам.

Избыточное внутреннее давление, приводящее к разрушению цементного кольца, определяется из следующего предельного соотношения:

$$p_{вт} \geq \frac{\sigma_p^ц + \chi_2^{отп} \cdot p_{кр}}{\chi_2}, \quad (11)$$

в котором коэффициенты концентрации напряжений χ_2 и $\chi_2^{отп}$ принимаются по таблицам, а величину предела прочности цементного камня на растяжение можно принять равной $\sigma_p^ц = 0.1\sigma_{сж}^ц$, где $\sigma_{сж}^ц$ – предел прочности цементного камня на одноосное сжатие.

Четвертая глава посвящена изучению влияния неопределенности свойств и состояния вмещающего скважину породного массива на ее устойчивость и разработке методики ее учета в ходе оценки устойчивости. Для анализа вероятности наступления критического состояния был использован метод Монте-Карло. Наступление критического состояния или исчерпание запаса прочности конструкции можно представить как координату точки пересечения двух функций плотностей вероятностей $f_Q(Q)$ и $f_R(R)$, где Q – обобщенная нагрузка на конструкцию сооружения, а R – обобщенное сопротивление, или, обобщенная прочность конструкции сооружения, как это показано на рис. 4.

Для оценки устойчивости скважины в процессе строительства скважины, для каждого параметра, влияющего на обобщенные нагрузки и сопротивления в ходе бурения, было получено 1000 значений с помощью генерации псевдослучайных чисел, после чего каждая комбинация значений была

использована для расчета минимальной и максимальной допустимой плотностей бурового раствора.

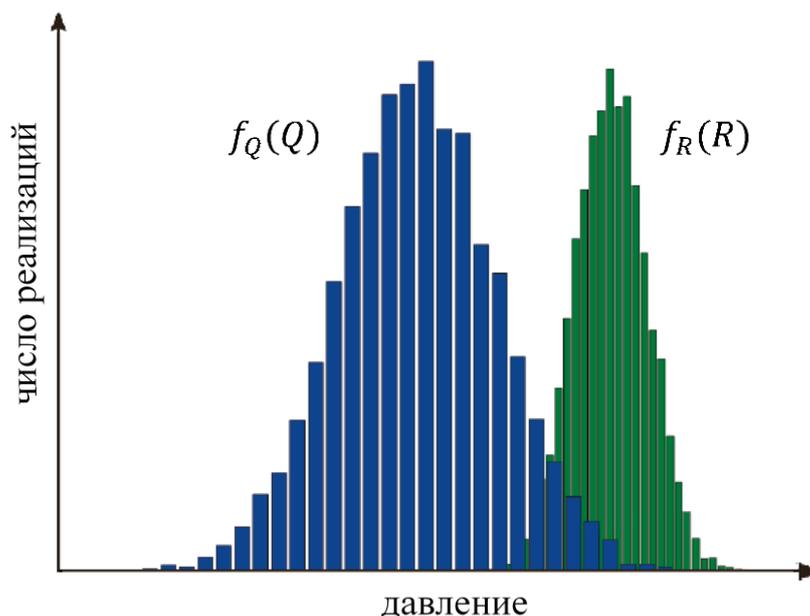


Рисунок 4 – Наступление критического состояния конструкции

В результате многовариантных расчетов, выполненных с использованием приведенных выше распределений и эмпирических зависимостей для скважин глубиной 1000, 2000 и 3000 метров были получены кривые вероятностей устойчивого состояния стенок скважин для пород II и III категорий по буримости, приведенные на рисунках 5 – 6.

Проанализировав полученные результаты, можно утверждать, что для пород II категории по буримости устойчивость открытого ствола скважины с вероятностью 100% достигается в диапазоне относительных плотностей бурового раствора $0.5 \leq \frac{\gamma_p}{\gamma} \leq 1.0$. При этом указанный диапазон справедлив для скважин глубиной 1000, 2000 и 3000 метров, что отражает факт незначительного влияния на прочность пород отношения $k/\rho h$ ввиду малых величин коэффициента сцепления k .

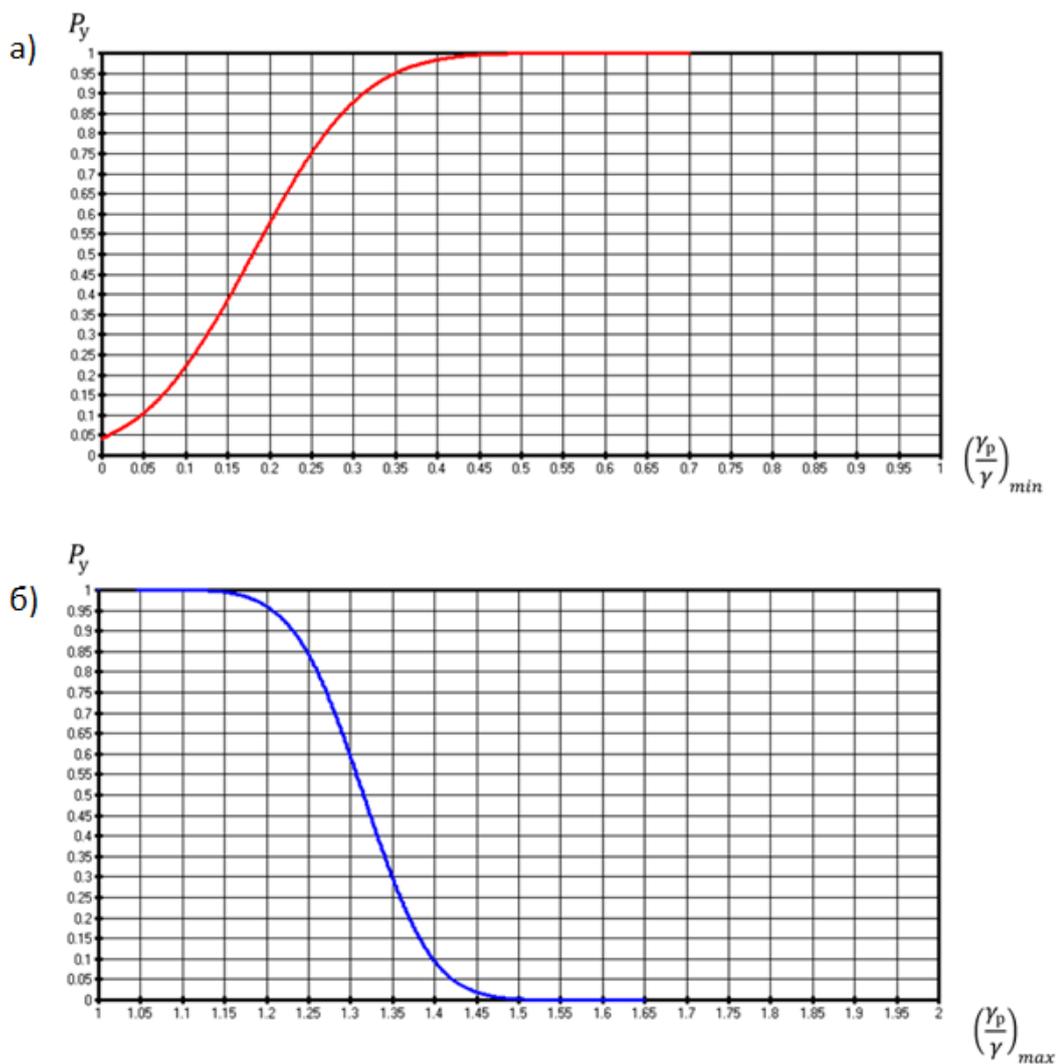


Рисунок 5 - Вероятности устойчивого состояния открытого ствола скважин глубиной 1000-3000 м для пород II категории буримости при различных минимальных (а) и максимальных (б) относительных плотностях бурового раствора

Для пород III категории буримости устойчивость открытого ствола скважины с вероятностью 100% достигается в следующих диапазонах относительных плотностей бурового раствора:

- для глубин $h \leq 1000$ м: $0.2 \leq \frac{\gamma_p}{\gamma} \leq 1.4$;
- для глубин $1000 < h \leq 2000$ м: $0.3 \leq \frac{\gamma_p}{\gamma} \leq 1.3$;
- для глубин $2000 < h \leq 3000$ м: $0.4 \leq \frac{\gamma_p}{\gamma} \leq 1.2$.

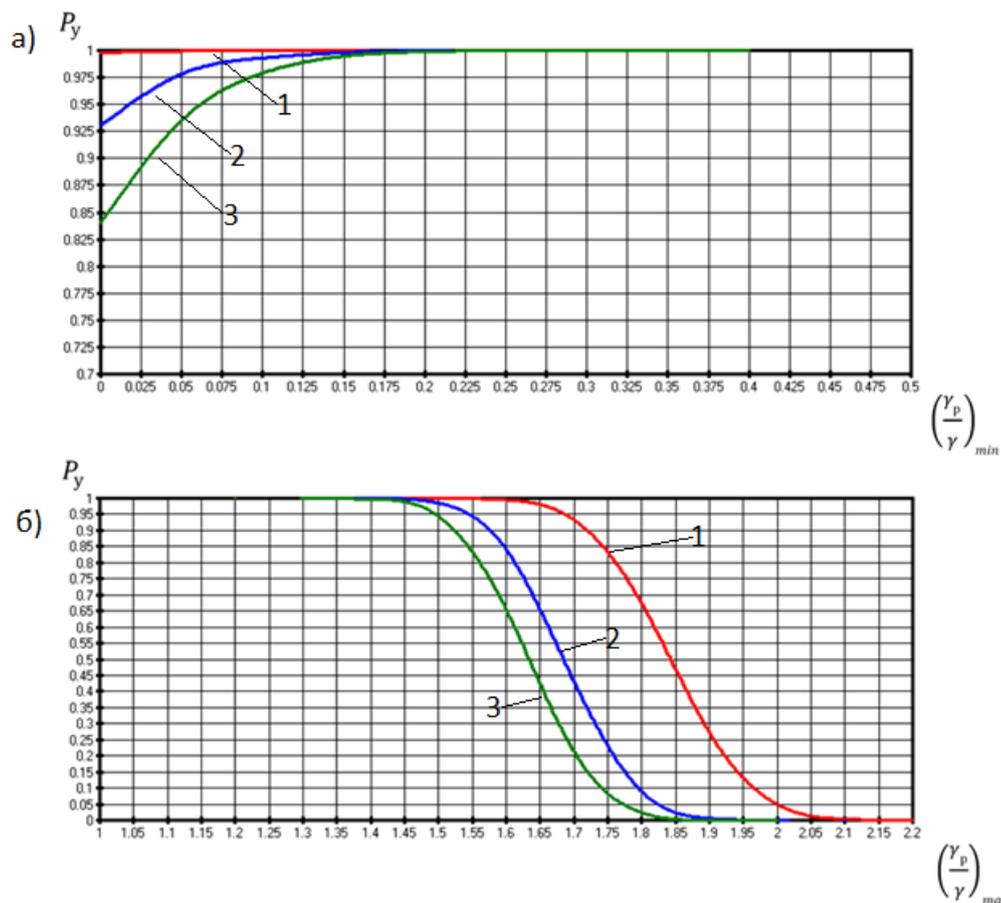


Рисунок 6 - Вероятности устойчивого состояния открытого ствола скважин глубиной: 1 – 1000м, 2 – 2000 м, 3 – 3000 м, для пород III категории буримости при различных минимальных (а) и максимальных (б) относительных плотностях бурового раствора

Таким образом, по результатам расчетов можно констатировать, что относительная плотность бурового раствора, лежащая в диапазоне $0.5 \leq \frac{\gamma_p}{\gamma} \leq 1.0$, включает в себя диапазоны для пород III категории буримости и обеспечивает устойчивость открытого ствола скважин в породах II и III категорий по буримости. Кроме того, указанный диапазон может быть распространен и на более высокие категории вследствие большей прочности пород.

Для оценки устойчивости скважины после окончания строительства и установки крепи, с помощью генерации псевдослучайных чисел было получено 1000 значений каждого параметра, входящего в полученные ранее предельные соотношения, при которых происходит разрушение цементного кольца или обсадной колонны скважины.

После статистической обработки результатов многовариантных расчетов были получены значения предельных величин давлений, при достижении до

которых достигается устойчивое состояние обсадных колонн, представленные в таблице 2.

Таблица 2 - Предельные величины литостатического давления $(\sigma_v)_{пр}$ (МПа), до которых достигается устойчивое состояние обсадных колонн при воздействии избыточного внешнего воздействия

Диаметр колонны, мм	Диаметр скважины, мм	Толщина стенки обсадной колонны, мм							
		6	7	8	9	10	11	12	14
114	140	25.5	28.7	31.6	35.9	-	-	-	-
	161	25.2	28.1	30.4	32.9	-	-	-	-
127	161	23.5	26.4	29.0	31.6	-	-	-	-
	190	23.5	25.9	28.2	30.5	-	-	-	-
140	190	22.3	24.7	26.9	29.1	30.8	33.0	-	-
	214	22.2	24.5	26.5	28.6	30.5	32.2	-	-
146	190	-	23.9	26.2	28.4	30.4	32.7	-	-
	214	-	23.9	25.8	28.0	29.8	31.6	-	-
168	214	-	21.6	23.8	25.8	27.8	29.8	31.5	35.2
	243	-	21.8	23.8	25.6	27.4	29.1	30.7	33.9
194	243	-	19.5	21.5	23.3	25.1	26.9	28.6	32.0
	269	-	19.9	21.6	23.3	25.0	26.6	28.1	31.2
219	269	-	17.8	19.6	21.3	23.0	24.7	26.2	29.5
	295	-	18.3	20.0	21.4	23.0	24.6	26.0	29.0
	320	-	18.7	20.2	21.7	23.1	24.5	25.9	28.6
245	295	-	16.4	18.0	19.6	21.2	22.7	24.2	27.2
	320	-	17.0	18.5	19.9	21.4	22.8	24.2	26.9
	346	-	17.4	18.8	20.1	21.5	22.8	24.2	26.7
273	346	-	15.6	17.0	18.4	19.7	21.1	22.4	-
	395	-	16.5	17.8	19.0	20.1	21.4	22.6	-
299	395	-	-	16.3	17.6	18.8	19.9	21.1	-
	445	-	-	17.1	18.1	19.3	20.3	21.4	-
324	445	-	-	-	17.0	18.1	19.1	20.1	-

Приведенные в таблице 2 предельные величины литостатического давления $(\sigma_v)_{пр}$ предполагают нулевое внутритрубное давление. После достижения данной величины для обеспечения устойчивости обсадной колонны к воздействию избыточного внешнего давления необходимо создание и поддержание внутритрубного давления.

Предельные значения величин внутренних давлений $(p_{вт})_{пр}^к$ и $(p_{вт})_{пр}^ц$, при которых обеспечиваются устойчивые состояния соответственно обсадной колонны и цементного кольца при воздействии внутреннего избыточного

давления, полученные в результате многовариантных расчетов приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Предельные величины избыточного внутреннего давления $(p_{вт})_{пр}^к$ в МПа, при которых обеспечивается устойчивость обсадной колонны

Диаметр колонны, мм	Диаметр скважины, мм	Толщина стенки обсадной колонны, мм							
		6	7	8	9	10	11	12	14
114	140	37.7	43.6	49.6	55.7	-	-	-	-
	161	39.7	45.6	51.7	57.7	-	-	-	-
127	161	34.6	39.8	45.2	50.7	-	-	-	-
	190	36.8	42.1	47.5	53.0	-	-	-	-
140	190	32.6	37.5	42.3	47.1	52.1	57.0	-	-
	214	34.0	38.9	43.8	48.7	53.6	58.6	-	-
146	190	-	35.4	39.9	44.6	49.3	54.1	-	-
	214	-	37.0	41.6	46.3	51.1	55.8	-	-
168	214	-	30.9	34.9	38.9	42.9	47.0	51.1	59.3
	243	-	32.6	36.6	40.6	44.7	48.8	52.9	61.2
194	243	-	27.1	30.4	33.9	37.3	40.8	44.2	51.2
	269	-	28.4	31.8	35.2	38.7	42.2	45.8	52.8
219	269	-	24.0	27.1	30.0	33.1	36.1	39.2	45.4
	295	-	23.9	28.3	31.3	34.4	37.5	40.5	46.8
	320	-	26.1	29.2	32.3	35.3	38.5	41.6	47.8
245	295	-	21.6	24.3	27.0	29.6	32.3	35.0	40.5
	320	-	22.7	25.4	28.0	30.7	33.4	36.2	41.7
	346	-	23.5	26.2	29.0	31.8	34.4	37.2	42.8
273	346	-	20.3	22.7	25.1	27.5	30.0	32.4	-
	395	-	21.7	24.1	26.7	29.1	31.6	34.1	-
299	395	-	-	21.5	23.7	26.0	28.1	30.4	-
	445	-	-	22.7	25.0	27.4	29.6	31.9	-
324	445	-	-	-	22.6	24.7	26.8	28.8	-

Таблица 4 - Предельные величины избыточного внутреннего давления $(p_{вТ})_{пр}^ц$ в МПа, при которых обеспечивается устойчивость цементного кольца

Диаметр колонны, мм	Диаметр скважины, мм	Толщина стенки обсадной колонны, мм							
		6	7	8	9	10	11	12	14
114	140	4.8	5.7	6.6	7.5	-	-	-	-
	161	5.3	6.2	7.1	8.1	-	-	-	-
127	161	4.5	5.2	6.0	6.8	-	-	-	-
	190	5.1	5.8	6.6	7.5	-	-	-	-
140	190	4.3	5.0	5.7	6.4	7.1	7.9	-	-
	214	4.8	5.4	6.1	6.8	7.6	8.4	-	-
146	190	-	4.7	5.3	5.9	6.6	7.4	-	-
	214	-	5.1	5.7	6.4	7.1	7.8	-	-
168	214	-	4.0	4.5	5.1	5.6	6.2	6.9	8.2
	243	-	4.5	5.0	5.6	6.1	6.7	7.4	8.7
194	243	-	3.5	3.9	4.4	4.9	5.3	5.8	6.9
	269	-	3.9	4.3	4.7	5.2	5.7	6.2	7.3
219	269	-	3.0	3.5	3.8	4.2	4.6	5.1	5.9
	295	-	3.3	3.8	4.2	4.6	5.0	5.5	6.3
	320	-	3.6	4.1	4.4	4.9	5.3	5.7	6.6
245	295	-	2.8	3.1	3.4	3.8	4.1	4.5	5.5
	320	-	3.0	3.4	3.7	3.8	4.1	4.5	5.5
	346	-	3.2	3.6	3.9	4.3	4.7	5.0	5.8
273	346	-	2.7	2.9	3.3	3.5	3.9	4.2	-
	395	-	3.1	3.4	3.7	4.0	4.3	4.6	-
299	395	-	-	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	-
	445	-	-	3.3	3.5	3.9	4.2	4.4	-
324	445	-	-	-	3.1	3.4	3.6	3.9	-

На рисунках 7 и 8 приведены кривые вероятностей устойчивого состояния цементного кольца при различных давлениях опрессовки скважин глубиной 1000, 2000 и 3000 м.

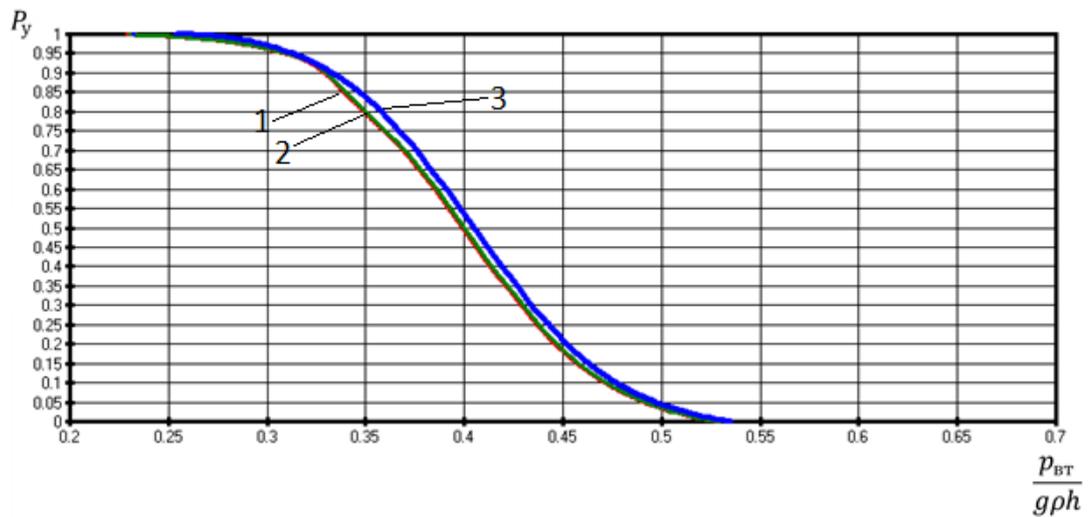


Рисунок 7 – Вероятности устойчивого состояния цементного кольца при опрессовке скважины для различных внутритрубных давлений $\frac{p_{вт}}{g\rho h}$ при плотности цементного раствора $\rho_{ц} = 1800 \text{ кг/м}^3$ и глубинах:
1 – 1000м, 2 – 2000 м, 3 – 3000 м

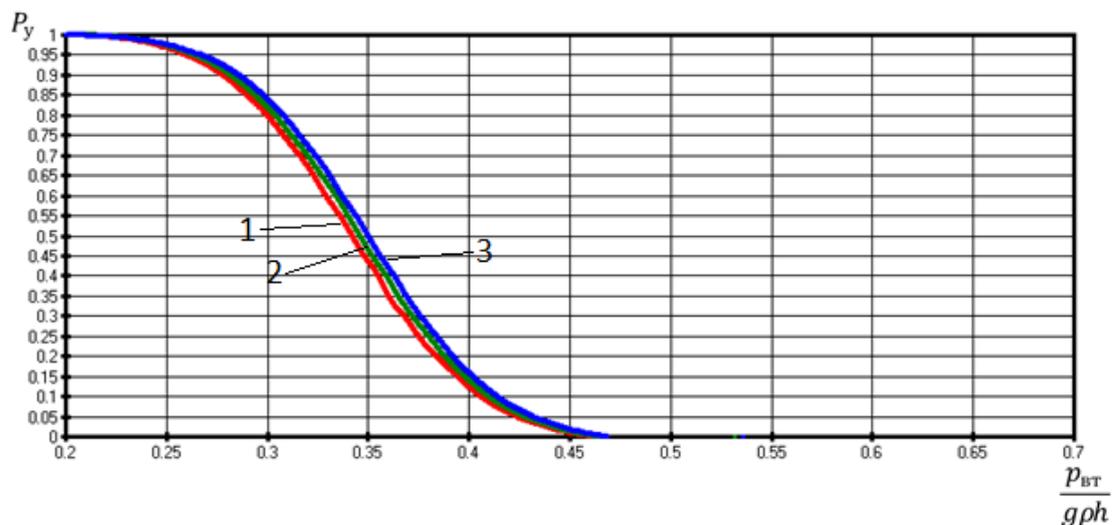


Рисунок 8 – Вероятности устойчивого состояния цементного кольца при опрессовке скважины для различных внутритрубных давлений $\frac{p_{вт}}{g\rho h}$ при плотности цементного раствора $\rho_{ц} = 1600 \text{ кг/м}^3$ и глубинах :
1 – 1000м, 2 – 2000 м, 3 – 3000 м

Из результатов расчетов следует, что герметичность цементного кольца в интервале «башмака» обсадной колонны со 100% вероятностью обеспечивается при давлениях опрессовке, не превышающих $p_{вт} = 0.2 \text{ g}\rho h$, что составляет:

- для глубины до 1000 м $p_{вт} = 4.2 \text{ МПа}$;
- для глубины до 2000 м $p_{вт} = 8.8 \text{ МПа}$;

- для глубины до 3000 м $p_{вТ} = 13.8$ МПа.

Основываясь на результатах исследований, проведенных в четвертой главе, была разработана методика прогнозирования устойчивости эксплуатационных скважин подземных хранилищ газа в условиях ограниченной информации о свойствах и напряженном состоянии массива. Данная методика позволяет оценить вероятность устойчивости открытого ствола скважины в процессе ее строительства при выбранных плотностях бурового раствора, а также вероятность устойчивости скважин в процессе эксплуатации при выбранных конструктивных параметрах обсадных колонн и цементного камня. Данная методика представлена в Приложении А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научная задача обоснования и разработки метода прогнозирования устойчивости эксплуатационных скважин подземных хранилищ газа в условиях ограниченной информации о свойствах и состоянии вмещающего её породного массива, что имеет существенное значение для повышения эксплуатационной надежности подземных хранилищ газа, являющихся важным элементом единой газотранспортной системы страны.

Основные научные результаты и выводы по выполненным в диссертации исследованиям заключаются в следующем:

1. Проведен анализ современного состояния исследований в области обеспечения устойчивости скважин ПХГ в процессе их строительства и эксплуатации. Установлено, что строительство и эксплуатация скважин осуществляются в условиях высокой степени неопределенности, обусловленной неоднородностью породного массива, ограниченностью знаний о его механических свойствах и состоянии, влиянием случайных технологических факторов, что приводит к несоответствию используемых в расчетах устойчивости детерминированных моделей реальному объекту.

2. Получена количественная оценка диапазона плотностей бурового раствора, при которых не наступают критические состояния открытого ствола скважин, учитывающая прочностные свойства пород в прискважинной области, пластовое давление, начальное напряженное состояние породного массива и технологические особенности строительства.

3. Получено аналитическое выражение временной зависимости величины давления горных пород на крепь скважины и на этой основе установлены

предельные значения глубин, при которых может наступать критическое состояние обсадной колонны.

4. Произведено имитационное моделирование, на основе которого выполнена оценка влияния случайных изменений свойств и состояния массива, конструктивных параметров скважин на возникновение критических состояний конструкции скважины.

5. Разработаны рекомендации по количественной оценке вероятности наступления критических состояний в процессе строительства и эксплуатации.

6. Проанализированы причины и следствия ограниченного характера информации о структурных особенностях, свойствах и состоянии массива в окрестностях эксплуатационных скважин ПХГ.

7. Разработана «Методика прогнозирования устойчивости эксплуатационных скважин подземных хранилищ газа в условиях ограниченной информации о свойствах и напряженном состоянии массива», принятая к использованию в ООО «Газпром геотехнологии».

Основные положения научно-квалификационной работы (диссертации) опубликованы в следующих статьях:

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Хлопцов Д.В. Устойчивость открытого ствола эксплуатационных скважин подземных хранилищ углеводородов с различной траекторией // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4. – с. 238-246.
2. Хлопцов Д.В., Винников В.А. Определение давления горных пород на крепь скважины // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 8 – С. 74 – 82. (индексируется в базе данных Scopus)
3. Хлопцов Д.В. Оценка вероятности наступления критических состояний открытого ствола эксплуатационных скважин подземных хранилищ газа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 172–182. (индексируется в базе данных Scopus)

В прочих изданиях:

4. Хлопцов Д.В. Особенности формирования нагрузок на конструкции скважин подземных хранилищ газа в каменной соли // 72-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ -2018». Сборник тезисов. Том 1. – 2018. – с. 348-349.
5. Хлопцов Д.В. Оценка вероятности наступления критических состояний крепи эксплуатационных скважин ПХГ // XIII Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика)». Тезисы докладов. Секция 1 «Геология, поиск и разведка нефтегазовых месторождений». – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2019. – С. 114-115.