УДК 622.24:629.12.74:539.4 ***DOI: 10.46960/2782-5477_2023_4_40***

Е.Н. Горбиков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛОТНОСТИ БУРОВОГО РАСТВОРА НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДООТДЕЛЯЮЩЕЙ КОЛОННЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Приведены графики зависимости среднего значения максимального напряжения, возникающего в водоотделяющей колонне, от плотности бурового раствора при разработке морских нефтегазовых месторождений. Результаты исследования могут стать основой практических рекомендаций для определения безопасных режимов работы водоотделяющей колонны.

Ключевые слова: водоотделяющая колонна, комплекс подводного устьевого оборудования, напряженное состояние, буровой раствор, надводное плавучее сооружение, нерегулярное волнение.

Залежи энергоносителей на материковой части страны в результате интенсивной добычи в значительной степени истощились. Поэтому снижение объемов добычи нефти и газа на месторождениях в Сибири и на Дальнем Востоке требует ускорения темпов освоения энергоресурсов на прибрежном шельфе. Добыча углеводородов в прибрежной зоне требует создания новых сложных инженерных сооружений и технических средств для бурения скважин и добычи нефти и газа из подводных месторождений. Как показывает опыт освоения морских нефтегазовых ресурсов, несмотря на большие капитальные вложения добыча углеводородного сырья на прибрежных акваториях приносит значительную выгоду. Основные проблемы при освоении подводных месторождений − проблемы техники и технологии производства этих работ. Долговечность, надежность, безопасность и экологичность применяемого оборудования должны соответствовать срокам разработки нефтегазоносных месторождений.

При бурении скважин с плавучих надводных сооружений широко применяют комплекс подводного устьевого оборудования. Его основным элементом является водоотделяющая колонна (ВОК), обеспечивающая гибкую замкнутую связь между постоянно перемещающимся плавучим средством и неподвижной скважиной, расположенной на морском дне. Наиболее сложной задачей является обеспечение прочности ВОК и удержание углов поворота ее шаровых опор в рамках допустимого диапазона, определяемого технологией бурения скважин под водой. Растянутая усилием натяжения и заполненная внутри буровым раствором ВОК эксплуатируется в сложных условиях открытого моря. Такие условия работы приводят к повреждению как самой гибкой колонны, так и к поломке ее отдельных узлов. Причинами их появления могут служить продолжительный период воздействия на ВОК нерегулярного морского волнения и подводных течений, использование буровых растворов большой плотности, недостаточное натяжение колонны и др.

Водоотделяющая колонна состоит из отдельных секций-труб, соединенных между собой замковыми соединениями в единую гибкую конструкцию, опирается на две шаровые опоры и растягивается продольной силой (усилием натяжения). Нижняя опора находится на подводном устьевом оборудовании, расположенном на морском дне, и обеспечивает компенсацию угловых отклонений ВОК, вызванных ее изгибом и горизонтальными перемещениями плавучей платформы. В верхнюю часть конструкции включены скользящее телескопическое соединение, шаровая опора и механизм натяжения с целью исключения влияния качки плавучего средства на напряженно-деформированное состояние колонны. Обе шаровые опоры имеют собственный внутренний момент, обусловленный их конструктивным

исполнением. При изучении напряженного состояния ВОК практический интерес представляет непрерывно изменяющееся случайным образом во времени максимальное эквивалентное напряжение, возникающее в корпусе колонны. В качестве основной характеристики данного случайного процесса ограничимся рассмотрением математического ожидания, для оценки которого используем среднее арифметическое максимального эквивалентного напряжения.

Целью настоящего исследования является установление зависимости среднего арифметического максимального эквивалентного напряжения, действующего в конструкции, от плотности применяемого бурового раствора. Во время проведения буровых работ он непрерывно подается в скважину, охлаждает и смазывает буровой инструмент, создает гидростатическое давление, препятствующее прорыву нефти или газа, и удаляет из скважины разработанную породу. Плотность бурового раствора выбирается, исходя из условий сохранения устойчивости горных пород, образующих стенки скважины, и создания столбом раствора гидростатического давления на забой, предотвращающего поступление пластового флюида в ствол скважины.

Для решения поставленной задачи используем подход, изложенный в [1], где гибкая конструкция ВОК схематизируется балкой, имеющей нижнюю и верхнюю шарнирные опоры. Балка растянута продольным усилием натяжения и погружена в подвижный слой жидкости конечной глубины. Ее внутренняя полость заполнена буровым раствором. Прогиб конструкции в нестационарном потоке считается малой величиной по сравнению с длиной, что обеспечивается необходимым для нее натяжением и системой позиционирования плавучей платформы. Принимается, что векторы морского течения, волнового потока, горизонтального дрейфа плавучей платформы и упругая линия колонны лежат в одной вертикальной плоскости.

В [1] динамическое поведение ВОК в нестационарном потоке жидкости рассматривается в неподвижной системе координат XY, начало которой совпадает с нижней опорой (ось X направлена вертикально вверх, ось Y − горизонтально вправо), и описываются дифференциальным уравнением

$$a\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + b\frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} - (c + fx)\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + k\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - n\frac{\partial y}{\partial x} = q\,, \qquad (1)$$

которое дополняется граничными условиями на опорах

$$y(0,t) = 0\,, \quad EJ\frac{\partial^2 y(0,t)}{\partial x^2} = -M_{\text{но}}\,, \quad y(H,t) = S(t)\,, \quad EJ\frac{\partial^2 y(H,t)}{\partial x^2} = -M_{\text{во}}$$

и ограничениями на напряженно-деформированное состояние

$$\sigma \le [\sigma], \quad \varphi_{\text{но}} \le [\varphi_{\text{но}}], \quad \varphi_{\text{во}} \le [\varphi_{\text{во}}], \quad l_{\text{тк}} \le [l_{\text{тк}}].$$

Здесь $y(x,t)$ – прогиб конструкции ВОК в потоке окружающей жидкости; x – координата поперечного сечения колонны; t – время; a, b, c, f, k, n − коэффициенты при производных, зависящие от геометрических, жесткостных и весовых характеристик конструкции, усилия натяжения и плотности бурового раствора; q − интенсивность гидродинамической нагрузки, действующей на ВОК со стороны морских волн и течений; E − модуль упругости материала конструкции; H – глубина моря в месте бурения; J − момент инерции площади поперечного сечения; $M_{\text{но}}$, $M_{\text{во}}$ − собственные внутренние моменты в нижней и верхней шаровых опорах, обусловленные их конструктивным исполнением; σ − максимальное эквивалентное напряжение в корпусе колонны; $S(t)$ − горизонтальное перемещение плавучей буровой платформы; $\varphi_{\text{но}}$, $\varphi_{\text{во}}$ − углы отклонения оси ВОК от вертикали в нижней и верхней опорах

соответственно; $l_{тк}$ − длина хода телескопического компенсатора; $[\sigma]$, $[\varphi_{но}]$, $[\varphi_{во}]$, $[l_{тк}]$ − допускаемые значения соответствующих величин.

Для определения горизонтальных перемещений $S(t)$ при волнении моря различной интенсивности используем амплитудно-частотные характеристики продольно-поперечных колебаний заякоренной полупогружной буровой установки (ППБУ) [2].

Гидродинамическую нагрузку на ВОК рассчитываем по формуле Морисона, учитывающей эффект относительного движения гибкой конструкции в потоке жидкости. Моделирование морских нерегулярных волн проводим с помощью конечного числа гармоник, применяя спектр Пирсона-Московица [3]. Предполагаем, что изменение скорости приливного течения по глубине акватории описывается зависимостью [4]:

$$V_{т} = V_0 \left(\frac{x}{H} \right)^{1/7}, \qquad (2)$$

где V_0 − скорость течения на поверхности моря.

Среднее значение максимального эквивалентного напряжения получаем путем статистической обработки результатов вычислительного эксперимента, в котором моделировалась работа ВОК с буровым раствором разной плотности на акватории прибрежного шельфа.

В качестве объекта исследования была выбрана ВОК, изготовленная из стали 30ХМА. Вес одного метра длины конструкции составляет $3{,}3 \cdot 10^3$ Н/м, наружный и внутренний диаметры колонны равны 0,610 м и 0,584 м соответственно. Глубина моря H, относительное (отнесенное к весу ВОК) усилие натяжения T, относительная (отнесенная к глубине моря) статическая составляющая S горизонтального дрейфа ППБУ, высота волны трехпроцентной обеспеченности $h_{3\%}$, скорость приливного течения и плотность бурового раствора задавались, исходя из возможных условий эксплуатации комплекса подводного устьевого оборудования. Ниже приводятся некоторые результаты проведенного исследования.

В статье рассматривается случай проведения работ на акватории с глубиной H=90 м при четырех вариантах статической составляющей S относительного смещения ППБУ, двух вариантах относительного натяжения T колонны и волнении моря с $h_{3\%}$=5 м в сочетании с приливным течением и без него. Плотность применяемого бурового раствора варьируется в диапазоне 1030 кг/м^3 $\leq \rho \leq$ 2500 кг/м^3. Внутренние моменты в нижней и верхней опорах ВОК отсутствуют ($M_{но} = M_{во} = 0$).

На рис. 1 представлен график зависимости среднего значения m_σ относительного (отнесенного к $[\sigma]$) максимального эквивалентного напряжения в ВОК от плотности ρ бурового раствора при натяжении T=3. Приливное течение отсутствует (V_0=0).. Из графика следует, что начальные участки всех изолиний S=const статического дрейфа ППБУ, ограниченные интервалом изменения плотности от ρ=1030 кг/м^3 до $\rho \approx$1350 кг/м^3, демонстрируют практически одинаковое незначительное снижение уровня действующих напряжений m_σ с увеличением плотности бурового раствора. На этом участке изолинии S=0 и S=0,01 практически совпадают. Все минимальные значения m_σ, соответствующие различным S, имеют место, когда плотность раствора составляет около 1350 кг/м^3. Дальнейшее увеличение его плотности до значений $\rho \approx$2000 кг/м^3 вызывает резкий рост m_σ в гибкой конструкции ВОК. Все изолинии имеют четко выраженный максимум в окрестности ρ=2000 кг/м^3. В рассматриваемом случае максимум m_σ варьируется от $m_\sigma \approx$ 0,204, когда ППБУ находится над скважиной ($S = 0$), до $m_\sigma \approx 0{,}281$ в случае ее отклонения от оси скважины на расстояние S=0,03. При этом, чем больше величина статического отклонения S платформы, тем выше уровень напряжений m_σ. После прохождения максимума наблюдается резкое

уменьшение m_σ при использовании бурового раствора с плотностью, превышающей 2000 кг/м^3. Достижение напряжениями m_σ максимальных значений обусловлено приближением частоты, соответствующей максимуму энергетического спектра нерегулярного морского волнения, к частоте собственных колебаний ВОК, заполненной буровым раствором с плотностью ρ≈2000 кг/м^3.

В целом анализ графика (рис. 1) показывает, что наибольшее влияние на напряженное состояние конструкции при всех рассматриваемых *S* оказывает плотность бурового раствора, изменяющаяся от ρ≈1350 кг/м^3 до ρ=2500 кг/м^3.

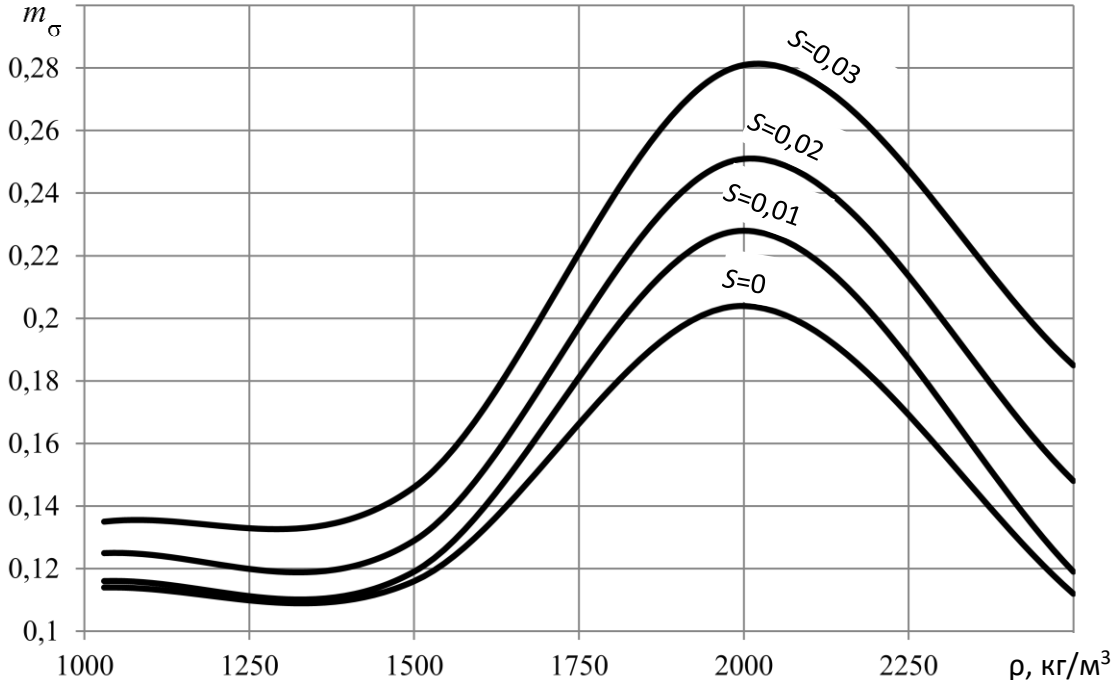

Рис. 1. Зависимость m_σ от плотности ρ бурового раствора: *H*=90 м; V_0=0; $h_{3\%}$=5 м; *T*=3

На рис. 2 изображены кривые зависимости m_σ от плотности ρ бурового раствора при эксплуатации ВОК с натяжением *T*=5, превосходящим рассмотренное в предыдущем примере, при тех же глубине акватории, состоянии моря и отсутствии приливного течения.

Сравнительный анализ приведенных на рис. 1 и 2 графиков позволяет заключить, что характер влияния ρ раствора на напряжения m_σ после перехода от натяжения *T*=3 к *T*=5 практически не изменился. Об этом говорит форма изолиний *S*=const смещения ППБУ. Максимумы этих изолиний также приходятся на ρ≈2000 кг/м^3, как и при *T*=3. Максимальные значения m_σ незначительно выросли по величине по сравнению со случаем, когда *T*=3, за исключением смещения *S*=0,03, при котором величина m_σ уменьшилась. Необходимо отметить, что в интервале от ρ=1030 кг/м^3 до ρ≈1350 кг/м^3 уровень напряженности конструкции ВОК становится немного выше из-за увеличения натяжения до *T*=5. При этом сохраняется тенденция к плавному уменьшению m_σ по мере приближения ρ к правой границе указанного интервала. Кроме того, использование тяжелого раствора плотностью ρ=2500 кг/м^3 при натяжении *T*=5 приводит к росту m_σ для всех рассматриваемых *S*, если сравнивать с *T*=3. Приведенные на рис. 3 и 4 графики получены для ВОК, работающей на приливно-отливной акватории. Новые условия эксплуатации колонны отличаются от рассмотренных выше (рис. 1 и 2) тем, что на данной акватории с прежней глубиной (*H*=90 м) и состоянием моря ($h_{3\%}$=5 м)

присутствует приливное течение с поверхностной скоростью $V_0 = 1$ м/с . Сравнение графиков на рис. 1 и 2, построенных для условий работы ВОК на акватории, где приливное течение отсутствует, с соответствующими графиками на рис. 3 и 4, учитывающих влияние приливного течения, показывает, что оно вносит существенное изменение в характер зависимости напряженного состояния колонны от плотности бурового раствора. В обоих случаях как при *T*=3, так и при *T*=5, приливное течение приводит к повышению уровня напряженности конструкции. Более высокий уровень напряжений вызван увеличением доли растягивающих напряжений в общем напряженном состоянии ВОК. Изображенный на рис. 3 график получен для ВОК, растянутой усилием натяжения *T*=3. На нем изолинии отклонений $S = \text{const}$ плавучего сооружения представляют собой практически прямые линии, отражающие зависимость напряжений m_σ от плотности ρ, близкую к линейной, и возрастание m_σ по мере

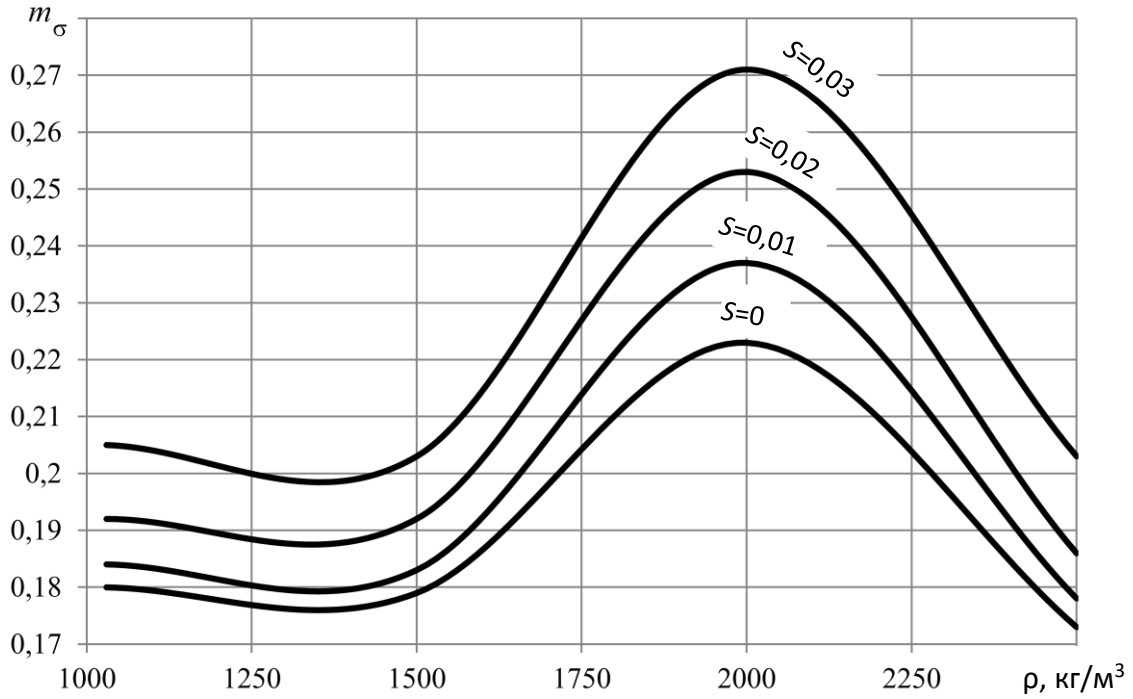

Рис. 2. Зависимость m_σ от плотности ρ бурового раствора: *H*=90 м; V_0=0; $h_{3\%}$=5 м; *T*=5

утяжеления применяемого раствора. Наименьшее влияние ρ на величину m_σ оказывает при нулевом отклонении платформы от

первоначального положения над скважиной (*S*=0). По мере удаления ППБУ от устья скважины и перевод ВОК на работу с более тяжелыми буровыми растворами делает зависимость m_σ от ρ более заметной. В наибольшей степени это проявляется при смещении *S*=0,03. Это объясняется тем, что чем дальше от точки бурения смещается ППБУ, тем сильнее сказывается влияние веса бурового раствора, заполняющего ВОК, на искривление ее упругой линии, приводящее к росту действующих напряжений в конструкции.

График, отражающий влияния плотности бурового раствора на напряжение m_σ при работе ВОК на той же акватории, но с натяжением *T*=5, приведен на рис. 4. Сравнение изображенных на рис. 3 и 4 графиков позволяет заметить, что характер зависимости m_σ от ρ при работе ВОК с *T*=5 (рис. 4), существенно отличается от случая, когда *T*=3 (рис. 3). Прежде всего, это уровень напряженности конструкции, который повысился при переходе от *T*=3 к *T*=5. Кроме того, при *T*=3 просматривается устойчивая тенденция роста m_σ с увеличением

плотности используемого раствора для всех рассматриваемых отклонений *S* платформы. В случае с *T*=5 картина изменения m_σ совершенно другая.

Изолиния *S*=0 на рис. 4 представляет собой ниспадающую кривую, указывая на постепенное уменьшение m_σ при увеличении тяжести бурового раствора с максимального m_σ≈0,233 при ρ=1030 кг/м^3 до минимального m_σ≈0,215 при ρ=2500 кг/м^3.

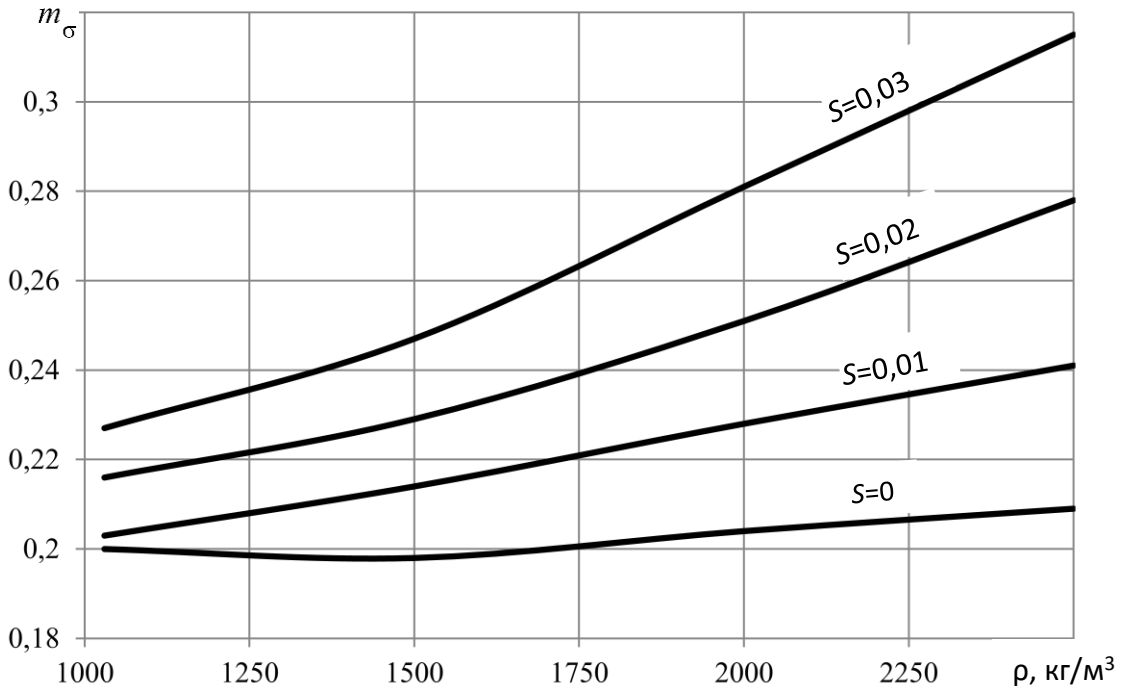

Рис. 3. Зависимость m_σ от плотности ρ бурового раствора: *H*=90 м; *V*$_0$=1 м/с; *h*$_{3\%}$=5 м; *T*=3

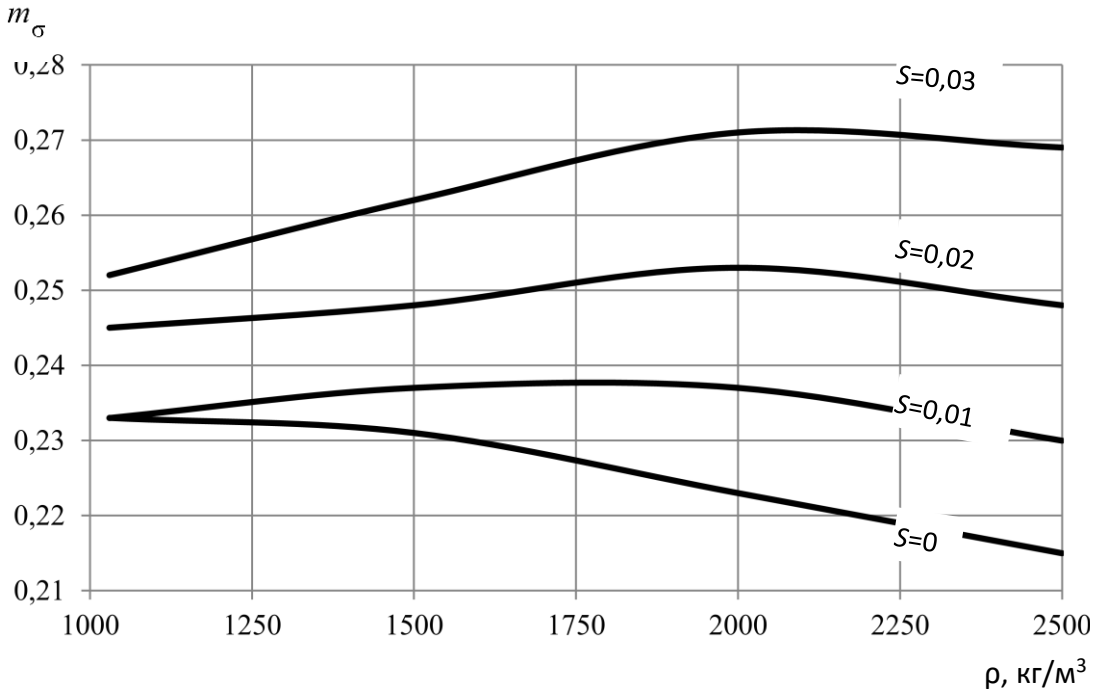

Рис. 4. Зависимость m_σ от плотности ρ бурового раствора: *H*=90 м; *V*$_0$=1 м/с; *h*$_{3\%}$=5 м; *T*=5

Кривая *S*=0,01, имея общую начальную точку с изолинией *S*=0 при минимальной плотности ρ=1030 кг/м^3, в отличие от нее, показывает незначительный рост m_σ с

последующим его замедлением по мере приближения к максимуму $m_\sigma \approx 0{,}238$, которому соответствует ρ≈1800 кг/м^3. Перейдя через максимум, изолиния *S*=0,01 идет на спад параллельно кривой *S*=0.

Изолинии *S*=0,02 и *S*=0,03 имеют похожую с кривой *S*=0,01 картину влияния ρ на m_σ, но на более высоком уровне напряжений в корпусе ВОК в результате увеличившегося статического дрейфа платформы. Для них также характерен некоторый сдвиг максимумов m_σ вправо вдоль оси ρ, если сравнивать с изолинией *S*=0,01. При этом, чем больше величина статического отклонения *S* платформы от точки бурения, тем дальше в сторону больших плотностей применяемого бурового раствора сдвигаются максимумы соответствующих изолиний. Это объясняется увеличением доли изгибающих напряжений в общем напряженном состоянии конструкции за счет увеличения тяжести бурового раствора, заполняющего внутреннюю полость ВОК.

По результатам проведенного вычислительного эксперимента была построена серия графиков, дающих информацию о напряженном состоянии ВОК во время проведения нефтегазодобычи на акватории прибрежного шельфа при других условиях эксплуатации, отличающихся от представленных в данной статье. На основании полученных результатов могут быть сформулированы практические рекомендации по выбору наиболее безопасных режимов работы ВОК. Полученные результаты могут представлять интерес для организаций, связанных с освоением нефтегазовых ресурсов на континентальном шельфе.

Библиографический список

1. Горбиков, Е.Н. Влияние скорости течения на напряженно-деформированное состояние водоотделяющей колонны при бурении скважин на приливно-отливных акваториях // Транспортные системы. 2022. № 3 (25). С. 40-46.
2. Борисов, Р.В. Расчет качки заякоренных плавучих буровых установок на регулярном и нерегулярном волнении / Р.В. Борисов, А.Б. Молодожников // Технические средства освоения мирового океана: Труды Ленинградского кораблестроительного института. − Л.: Судостроение, 1980. С. 22-27.
3. Бородай, И.К. Мореходность судов: Методы оценки / И.К. Бородай, Ю.А. Нецветаев. − Л.: Судостроение, 1982. − 288 с.
4. Доусон, Т. Проектирование сооружений морского шельфа / Т. Доусон − Л.: Судостроение, 1982. − 288 с.