

УДК 622.24.05:629.12.74

DOI: 10.46960/2782-5477_2023_1_43

Е.Н. Горбиков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ДРЕЙФА ПЛАВУЧЕГО СООРУЖЕНИЯ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДООТДЕЛЯЮЩЕЙ КОЛОННЫ

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

Приведены результаты расчета и графики зависимости среднего значения и стандартного отклонения максимального напряжения, возникающего в водоотделяющей колонне, от статической составляющей дрейфа плавучего сооружения при нерегулярном волнении моря различной интенсивности.

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

В большинстве нефтегазоносных районов материковой части страны в силу интенсивной эксплуатации месторождений наступает постепенное истощение запасов углеводородного сырья. Дальнейшая разработка требует применения дорогостоящих методов интенсификации добычи, что не всегда целесообразно. В связи с этим повышается интерес к освоению ресурсов нефти и газа на прибрежном шельфе. Новое направление в нефтегазодобыче связано не только с внедрением отличающихся от применяемых на суше технологических решений, но и с использованием нового оборудования и технических средств.

Комплекс подводного устьевого оборудования служит одним из примеров таких новых шельфовых нефтегазовых технических средств. Его основным элементом является водоотделяющая колонна (ВОК), обеспечивающая гибкую связь надводного плавучего сооружения с устьем скважины, расположенным на морском дне. Практика проведения добычи углеводородов на прибрежном шельфе показывает, что наиболее сложной задачей является обеспечение прочности ВОК и удержание углов поворота ее шаровых опор в рамках допустимого диапазона, определяемого технологией бурения скважин под водой. Во время эксплуатации ВОК подвергается воздействию внешнего и внутреннего гидростатических давлений, непрерывно изменяющейся волновой нагрузки, морских течений, усилия натяжения колонны, ее собственного веса и веса находящегося в ней бурового раствора. Помимо этих нагрузок, ВОК воспринимает динамическое воздействие со стороны плавучего сооружения при его горизонтальных перемещениях относительно первоначального положения.

Конструкция ВОК представляет собой тонкостенный длинномерный трубопровод, собранный из отдельных секций, опирающийся на две шаровые опоры и растянутый продольной силой (усилием натяжения). Нижняя опора находится под водой на донном устье скважины в неподвижном состоянии. Она обеспечивает компенсацию угловых отклонений колонны, вызванных ее изгибом и горизонтальными перемещениями плавучей буровой платформы. Для исключения влияния качки надводного сооружения на напряженно-деформированное состояние ВОК в верхнюю часть ее конструкции включены скользящее телескопическое соединение, шаровая опора и механизм натяжения. Перед проведением необходимых технологических операций буровая установка должна занять определенное начальное положение в заранее выбранной рабочей точке над устьем скважины, которое на глубинах до 200-300 м устанавливается с помощью якорной системы удержания. Особенность бурения с надводного плавучего сооружения заключается в том, что оно постоянно дрейфует в горизонтальном направлении относительно места добычи. Это может вызвать опасное провисание ВОК, которое приведет к разрушению как самой конструкции, так и к заклиниванию или поломке ее опор. Допускаемая величина такого горизонтального смещения в рабочем режиме

определяется гибкостью ВОК и конструкцией ее шаровых опор. Необходимую жесткость удержания полупогружной буровой установки (ППБУ) над скважиной в пределах допустимых горизонтальных отклонений обеспечивает предварительное натяжение цепей, создаваемое якорными лебедками. При изучении напряженного состояния ВОК практический интерес представляет непрерывно изменяющееся во времени максимальное эквивалентное напряжение, возникающее в корпусе колонны. Изменение этих напряжений во времени представляет собой случайный процесс.

Целью настоящего исследования является получение оценок основных характеристик данного случайного процесса в зависимости от статической составляющей горизонтального смещения плавучего средства относительно начального положения над скважиной. В качестве основных характеристик рассматриваем математическое ожидание, оценкой которого служит среднее арифметическое максимального эквивалентного напряжения, и стандартное отклонение. Статическая составляющая дрейфа плавучего сооружения определяется постоянной компонентой ветровой нагрузки, воздействием морского течения, дрейфовой скоростью волнового потока и натяжением якорных цепей.

Для решения поставленной задачи используем подход, предложенный 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. Считаем, что векторы морского течения, волнового потока, горизонтального дрейфа плавучей платформы и упругая линия колонны лежат в одной вертикальной плоскости. В [1] колебания ВОК в нестационарном потоке жидкости рассматриваются в неподвижной системе координат XU , начало которой совпадает с нижней опорой (ось X направлена вертикально вверх, ось U – горизонтально вправо), и описываются дифференциальным уравнением

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

которое дополняется граничными условиями на опорах:

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

и ограничениями на напряженно-деформированное состояние:

$$\sigma \leq [\sigma], \quad \varphi_{\text{HO}} \leq [\varphi_{\text{HO}}], \quad \varphi_{\text{BO}} \leq [\varphi_{\text{BO}}], \quad l_{\text{TK}} \leq [l_{\text{TK}}].$$

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; $M_{\text{HO}}, M_{\text{BO}}$ – 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; $\varphi_{\text{HO}}, \varphi_{\text{BO}}$ – углы отклонения оси ВОК от вертикали в нижней и верхней опорах соответственно; l_{TK} – длина хода телескопического компенсатора $[\sigma], [\varphi_{\text{HO}}], [\varphi_{\text{BO}}], [l_{\text{TK}}]$ – допускаемые значения соответствующих величин.

Для определения горизонтальных перемещений $S(t)$ при волнении моря различной интенсивности используем амплитудно-частотные характеристики продольно-поперечных колебаний заякоренной ППБУ [2]. Расчет гидродинамической нагрузки на ВОК выполняем по формуле Морисона, учитывающей эффект относительного движения 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 моря описывается зависимостью [4]:

$$V_T = V_0 \left(\frac{x}{H} \right)^{1/7},$$

где V_0 – скорость течения на поверхности моря.

Среднее значение m_σ и стандартное отклонение d_σ максимального эквивалентного напряжения получаем путем статистической обработки результатов вычислительного эксперимента, в котором моделировалась работа ВОК в различных условиях нерегулярного волнения моря. 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 дрейфа ППБУ, высота волны трехпроцентной обеспеченности $h_{3\%}$, скорость приливного течения и плотность бурового раствора задавались, исходя из возможных условий эксплуатации комплекса подводного устьевоего оборудования. Некоторые результаты проведенных исследований приведены на рис. 1-4.

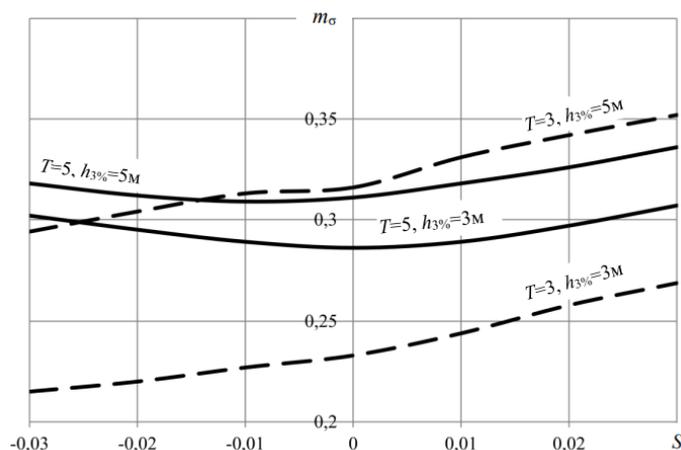


Рис. 1. Зависимость m_σ от статической составляющей S дрейфа ППБУ:

$H=140$ м; $V_0=1$ м/с; $\rho=1500$ кг/м³; $h_{3\%}=3$ м; $h_{3\%}=5$ м; $T=3$; $T=5$

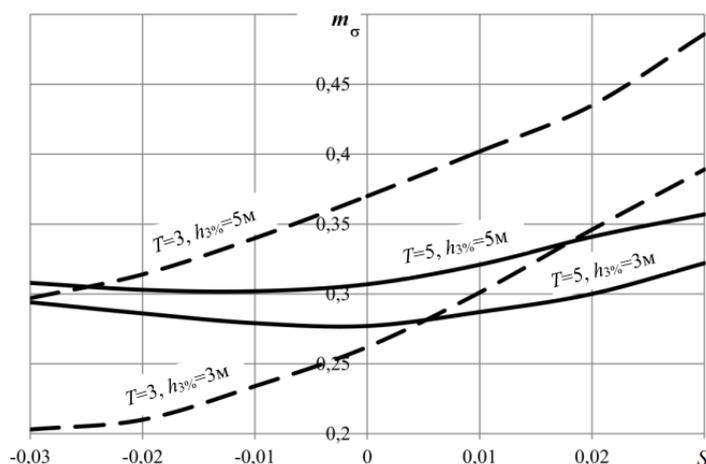


Рис. 2. Зависимость m_σ от статической составляющей S дрейфа ППБУ:

$H=140$ м; $V_0=1$ м/с; $\rho=2500$ кг/м³; $h_{3\%}=3$ м; $h_{3\%}=5$ м; $T=3$; $T=5$

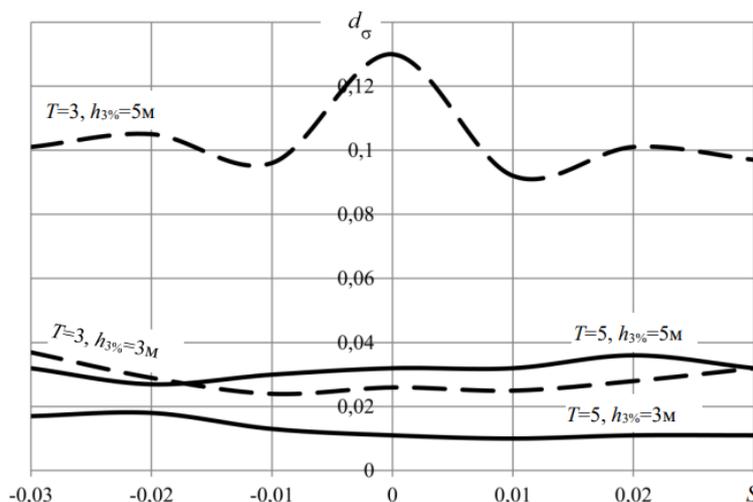


Рис. 3. Зависимость d_σ от статической составляющей S дрейфа ППБУ:
 $H=140\text{ м}$; $V_0=1\text{ м/с}$; $\rho=1500\text{ кг/м}^3$; $h_{3\%}=3\text{ м}$; $h_{3\%}=5\text{ м}$; $T=3$; $T=5$

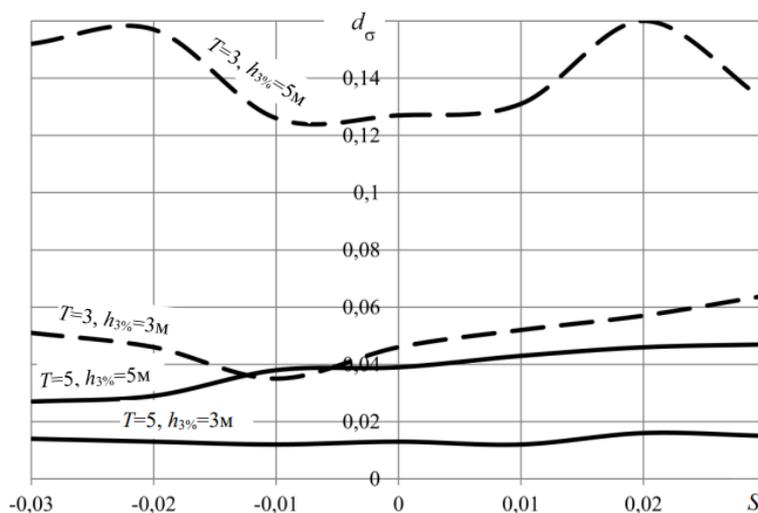


Рис. 4. Зависимость d_σ от статической составляющей S дрейфа ППБУ:
 $H=140\text{ м}$; $V_0=1\text{ м/с}$; $\rho=2500\text{ кг/м}^3$; $h_{3\%}=3\text{ м}$; $h_{3\%}=5\text{ м}$; $T=3$; $T=5$

Рассмотрим работу ВОК на приливной акватории ($V_0 = 1\text{ м/с}$) глубиной $H=140\text{ м}$ при нерегулярном волнении моря с $h_{3\%}=3\text{ м}$ и $h_{3\%}=5\text{ м}$. Колонна растягивается относительным усилием натяжения $T=3$ и $T=5$. Внутренние моменты в нижней и верхней опорах отсутствуют ($M_{\text{но}} = M_{\text{во}} = 0$). Плотность применяемого бурового раствора составляет $\rho = 1500\text{ кг/м}^3$ и $\rho = 2500\text{ кг/м}^3$. Статическая составляющая S дрейфа ППБУ относительно оси скважины варьируется в пределах $-0,03 \leq S \leq 0,03$.

На рис. 1 представлен график зависимости среднего значения m_σ относительного (отнесенного к $[\sigma]$) максимального эквивалентного напряжения в ВОК, заполненной буровым раствором плотностью $\rho = 1500\text{ кг/м}^3$, от статического отклонения S . Сравнение изолиний $T=3, h_{3\%}=3\text{ м}$ и $T=3, h_{3\%}=5\text{ м}$ показывает, что при одном и том же натяжении, но при разной высоте нерегулярных волн обе кривые близки по форме и идут практически параллельно друг другу. Из графика видно, что зависимость напряжений m_σ от величины статического

смещения S близка к линейной. При этом числовые значения m_{σ} существенно отличаются, что объясняется разной интенсивностью морского волнения. Перемещение плавучего сооружения от $S=0$ до $S=0,03$ в направлении волн и приливного течения приводит к росту напряжений в ВОК, связанному с увеличением ее прогиба в попутном потоке жидкости. В то же время, при движении ППБУ в противоположную сторону от $S=0$ до $S=-0,03$ имеет место уменьшение напряженности конструкции по мере удаления ППБУ от оси скважины ($S=0$). Снижение уровня напряжений имеет причиной уменьшение кривизны провисания колонны в результате воздействия встречного потока набегающей жидкости и, как следствие, снижение доли изгибающих напряжений в общем напряженном состоянии объекта исследования.

При работе ВОК с натяжением $T=5$ и волнении моря с $h_{3\%}=3$ м зависимость m_{σ} от S (рис. 1) имеет нелинейный характер. Соответствующая кривая $T=5$, $h_{3\%}=3$ м практически симметрична относительно вертикальной оси m_{σ} . Проходя выше изолинии $T=3$, $h_{3\%}=3$ м, она указывает на более высокий уровень m_{σ} в колонне по сравнению с $T=3$ при такой же интенсивности морского волнения. Это объясняется возрастанием доли растягивающего напряжения в общем напряженном состоянии упругой конструкции за счет увеличения ее натяжения. Изолиния $T=5$, $h_{3\%}=3$ м имеет минимум $m_{\sigma} \approx 0,287$, которому соответствует расположение платформы над устьем скважины ($S=0$). Справа и слева от минимума напряжения m_{σ} демонстрируют незначительный рост по мере удаления ППБУ от места первоначального расположения. Изолиния $T=5$, $h_{3\%}=5$ м также указывает на нелинейную зависимость между средним напряжением и статическим дрейфом ППБУ. Минимум $m_{\sigma} \approx 0,31$ данной кривой имеет место, когда $S \approx -0,01$.

Изолинии $T=3$, $h_{3\%}=5$ м и $T=5$, $h_{3\%}=5$ м пересекаются при $S \approx -0,015$. После пересечения левая (относительно точки пересечения) часть кривой $T=5$, $h_{3\%}=5$ м идет выше, а правая – ниже изолинии $T=3$, $h_{3\%}=5$ м. Причиной такого поведения изолиний является то, что при одинаковом волновом режиме ($h_{3\%}=5$ м), прежних скорости ($V_0 = 1$ м/с) и профиле приливного течения рассматриваемые усилия натяжения по-разному влияют на напряженное состояние ВОК в зависимости от расположения надводного плавучего сооружения относительно подводной скважины. В области $-0,015 \leq S \leq 0,03$ натяжение $T=5$ способствует уменьшению прогиба колонны в направлении приливного течения по сравнению с $T=3$, что приводит к уменьшению эквивалентных напряжений в ней. Но при $S < -0,015$, благодаря большей податливости гибкой конструкции, вызванной меньшим натяжением $T=3$, и боковой гидродинамической нагрузке, происходит спрямление ее упругой линии, направленной навстречу набегающему потоку. Это частично разгружает ВОК от напряжений изгиба. Таким образом, за счет уменьшения растягивающих и изгибающих напряжений значения m_{σ} становятся меньше по сравнению со случаем, когда натяжение $T=5$.

На рис. 2 изображены кривые зависимости m_{σ} от S , когда ВОК заполнена более тяжелым, по сравнению с рассмотренным выше случаем, буровым раствором с плотностью $\rho = 2500$ кг/м³. Анализ приведенных на рис. 1 и 2 графиков позволяет отметить, что влияние S на m_{σ} при работе ВОК с тяжелым буровым раствором является более заметным, когда $T=3$. Об этом говорит больший градиент изолиний $T=3$, $h_{3\%}=3$ м и $T=3$, $h_{3\%}=5$ м, полученных для $\rho = 2500$ кг/м³, по сравнению с аналогичными кривыми, построенными для $\rho = 1500$ кг/м³ при тех же характеристиках состояния моря и приливного течения.

Две другие изолинии $T=5$, $h_{3\%}=3$ м и $T=5$, $h_{3\%}=5$ м (рис. 2) мало отличаются друг от друга как по форме, так и по значениям m_{σ} , от соответствующих кривых, построенных для бурового раствора с $\rho = 1500$ кг/м³ (рис. 1). Значит, переход на более тяжелый буровой рас-

твор при $T=5$ и одинаковых внешних условиях практически не сказывается на m_{σ} . Графики зависимости стандартного отклонения d_{σ} напряжений от статической составляющей S дрейфа ППБУ при тех же глубине акватории, состоянии моря, профиле приливного течения и буровом растворе разной плотности показаны на рис. 3 и рис. 4.

Кривые $d_{\sigma}(S)$ при плотности бурового раствора $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$ изображены на рис. 3. Как показывает график, изолинии $T=3, h_{3\%}=3 \text{ м}$ и $T=3, h_{3\%}=5 \text{ м}$ проходят на значительном удалении друг от друга. Это говорит о том, что при фиксированном натяжении $T=3$ колонны интенсивность морского волнения существенно сказывается на значениях d_{σ} , причем большей высоте волны соответствует и большая величина стандартного отклонения напряжений. Кроме того, изолиния $T=3$ и $h_{3\%}=5 \text{ м}$ указывает на колебательный характер зависимости d_{σ} от S , заключающийся в неоднократном чередовании убывания и возрастания величины d_{σ} во всем диапазоне $-0,03 \leq S \leq 0,03$. Своего наибольшего значения $d_{\sigma} \approx 0,13$ стандартное отклонение достигает при $S \approx 0$. Два локальных максимума этой кривой имеют место около $S = -0,02$, где $d_{\sigma} \approx 0,105$, и в окрестности $S = 0,02$, здесь $d_{\sigma} \approx 0,101$. Отличительной особенностью данной изолинии является ее практически симметричный вид относительно оси d_{σ} .

Изолиния $T=3, h_{3\%}=3 \text{ м}$ (рис. 3) указывает на слабую зависимость величины d_{σ} от S , значения которого находятся в пределах $0,024 < d_{\sigma} < 0,037$, и имеет тенденцию к небольшому подъему по мере приближения к левой и правой границам рассматриваемого интервала изменения S . Влияние S на d_{σ} при $T=5$ характеризуют изолинии $T=5, h_{3\%}=3 \text{ м}$ и $T=5, h_{3\%}=5 \text{ м}$ (рис. 3). Они позволяют заметить малую изменчивость d_{σ} , значения которого лежат в интервале $0,027 < d_{\sigma} < 0,036$ при $h_{3\%}=5 \text{ м}$ и $0,010 < d_{\sigma} < 0,018$ при $h_{3\%}=3 \text{ м}$. Из графика (рис. 3) следует, что переход к большему натяжению ВОК приводит к уменьшению d_{σ} по сравнению с $T=3$ как при $h_{3\%}=3 \text{ м}$, так и при $h_{3\%}=5 \text{ м}$. Такое изменение в значениях d_{σ} особенно заметно, когда $h_{3\%}=5 \text{ м}$, и менее заметно, если $h_{3\%}=3 \text{ м}$. График, отражающий влияния статической составляющей S дрейфа ППБУ на стандартное отклонение d_{σ} напряжений от m_{σ} при работе ВОК с тяжелым буровым раствором плотностью $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$, приведен на рис. 4. Изолиния $T=3, h_{3\%}=5 \text{ м}$ показывает, что изменение d_{σ} в зависимости от S носит колебательный характер, как и в случае с буровым раствором меньшей плотности (рис. 3). Кривая практически симметрична относительно оси d_{σ} и имеет два максимума в окрестности $S = 0,020$ и вблизи $S = -0,022$, в которых $d_{\sigma} \approx 0,16$. При таких условиях эксплуатации ВОК влияние S на d_{σ} особенно заметно. Для такого же натяжения, но с волной $h_{3\%}=3 \text{ м}$, стандартное отклонение d_{σ} в несколько раз меньше, чем при $T=3$ и $h_{3\%}=5 \text{ м}$, из-за снижения интенсивности морского волнения.

Изолиния $T=3, h_{3\%}=3 \text{ м}$ имеет минимум $d_{\sigma} \approx 0,035$ при $S \approx -0,01$. Здесь влияние S на d_{σ} существенно меньше по сравнению с состоянием моря, имеющим волну $h_{3\%}=5 \text{ м}$. Стандартное отклонение варьируется от $d_{\sigma} \approx 0,035$ до $d_{\sigma} \approx 0,065$, достигая наибольших значений на границах интервала изменения S . Переход от натяжения $T=3$ к $T=5$ существенно снижает влияние S на d_{σ} как при волнении с $h_{3\%}=3 \text{ м}$, так и при $h_{3\%}=5 \text{ м}$. В случае с $h_{3\%}=3 \text{ м}$ (изолиния $T=5, h_{3\%}=3 \text{ м}$), стандартное отклонение d_{σ} практически не зависит от дрейфа S платформы. Значения d_{σ} находятся в очень узком интервале $0,012 < d_{\sigma} < 0,016$. Волнение моря с $h_{3\%}=5 \text{ м}$ (изолиния $T=5, h_{3\%}=5 \text{ м}$) увеличивает влияние S на d_{σ} по сравнению с $h_{3\%}=3 \text{ м}$, кото-

рое характеризуется постепенным ростом значений d_{σ} по мере приближения S к правой границе диапазона $-0,03 \leq S \leq 0,03$, и расширяет пределы его изменения от $d_{\sigma} \approx 0,027$ до $d_{\sigma} \approx 0,047$.

По результатам проведенного вычислительного эксперимента была построена серия графиков, аналогичных представленным на рис. 1-4. Они дают полную информацию о напряженном состоянии ВОК при проведении нефтегазодобычи на акваториях прибрежного шельфа. На основании этих материалов могут быть сформулированы практические рекомендации по выбору наиболее безопасных режимов работы ВОК в соответствии с существующими условиями эксплуатации.

Полученные материалы могут представлять интерес для организаций, связанных с проектированием и эксплуатацией комплекса подводно-устьевоего оборудования 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 [Текст] / Е.Н. Горбиков // Транспортные системы. 2022. №3 (25). С. 40-46.
2. **Борисов, Р.В.** Расчет качки заякоренных плавучих буровых установок на регулярном и нерегулярном волнении [Текст] / 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 [Текст] / И.К. Бородай, Ю.А. Нецветаев. – Л.: Судостроение, 1982. – 288 с.
4. **Доусон, Т.** Проектирование сооружений морского шельфа [Текст] / Т. Доусон – Л.: Судостроение, 1982. – 288 с.