

УДК 539.4:622.24.05:629.12.74

DOI: 10.46960/2782-5477\_2022\_3\_40

Е.Н. Горбиков

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДООТДЕЛЯЮЩЕЙ КОЛОННЫ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН НА ПРИЛИВНО-ОТЛИВНЫХ АКВАТОРИЯХ

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

Представлены результаты расчета среднего значения и стандартного отклонения максимального напряжения в водоотделяющей колонне, а также расчета среднего угла отклонения ее оси в нижней опоре для различных условий бурения скважин на приливно-отливных акваториях при нерегулярном волнении.

**Ключевые слова:** водоотделяющая колонна, морское бурение, комплекс подводного устьевого оборудования, напряженно-деформированное состояние, приливно-отливное течение, надводное плавучее сооружение

Освоение месторождений нефти и газа, залегающих в недрах морского дна, привело к созданию новой специальной техники для глубоководного бурения. Новые технические системы добычи углеводородов принципиально отличаются от традиционных объектов судостроения и гидротехники.

Появление новых средств разработки подводных месторождений энергоносителей вызвало множество проблем технического характера. Одна из них – обеспечение безопасных условий эксплуатации дорогостоящего технологического оборудования в суровых условиях открытого моря. Примером такой техники служит комплекс подводного устьевого оборудования для бурения глубоководных морских скважин с надводных плавучих сооружений (плавучие буровые платформы полупогружного типа, буровые суда). Основным элементом комплекса является водоотделяющая колонна (ВОК), обеспечивающая гибкую связь плавучего сооружения с установленным на дне оборудованием. Колонна изолирует скважину от окружающей морской воды, обеспечивает замкнутую циркуляцию бурового раствора, служит для спуска бурильного инструмента и погружения обсадной колонны. Проведение многих технологических операций возможно лишь при выполнении жестких ограничений на прочность корпуса и перемещения, совершаемые гибкой конструкцией ВОК в открытом море. Как показывает опыт эксплуатации комплекса, наиболее сложной проблемой является обеспечение прочности колонны.

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 в нестационарном потоке окружающей жидкости и горизонтальными перемещениями буровой платформы. Верхняя шаровая опора, оснащенная телескопическим компенсатором, располагается на надводном плавучем сооружении и исключает влияние его качки на напряженно-деформированное состояние ВОК.

Во время эксплуатации ВОК подвергается воздействию внешнего и внутреннего гидростатических давлений, нестационарной гидродинамической нагрузки от морских волн и

течений, растягивающего усилия натяжения, собственного веса колонны и веса, находящегося в ней бурового раствора. Сочетание всех названных силовых факторов делает ее расчет достаточно сложным. При исследовании напряженно-деформированного состояния ВОК практический интерес представляют непрерывно изменяющиеся во времени максимальное эквивалентное напряжение  $\sigma$ , возникающее в колонне во время эксплуатации, и угол отклонения  $\varphi_{\text{НО}}$  ее оси от вертикали в нижней опоре. Получение оценок основных характеристик этих двух случайных процессов является целью настоящего исследования. В качестве таких характеристик рассматриваем математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение (стандартное отклонение).

Гибкую конструкцию ВОК схематизируем балкой с малой жесткостью на изгиб, растянутой усилием натяжения, приложенным к ее верхнему концу и погруженной в подвижный слой жидкости конечной глубины. Балка имеет постоянное по длине поперечное сечение в форме кольца, лежит на двух шарнирных опорах и заполнена внутри буровым раствором. Верхняя опора помимо вращения допускает и конечные линейные перемещения. Нижняя шарнирная связь позволяет только угловые перемещения. Прогиб конструкции считаем малой величиной по сравнению с расстоянием между опорами, что обеспечивается необходимым усилием натяжения ВОК и системой позиционирования плавучей платформы, ограничивающей ее горизонтальные перемещения относительно точки бурения.

Колебания ВОК в нестационарном потоке жидкости рассматриваем в неподвижной системе координат  $XU$ , начало которой совпадает с нижней опорой. Ось  $X$  направлена вертикально вверх, ось  $U$  – горизонтально вправо. Принимаем, что векторы морского течения, волнового потока, смещения плавучей платформы и упругая линия колонны лежат в одной вертикальной плоскости  $XU$ .

Поведение ВОК в открытом море описываем дифференциальным уравнением в частных производных:

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

где  $y(x, t)$  – 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;  $q(x, t)$  – интенсивность гидродинамической нагрузки на ВОК от морских волн и течений.

Условия эксплуатации накладывают на конструкцию следующие ограничения:

– граничные условия на нижней и верхней опорах

$$\begin{aligned} y(0, t) = 0, \quad EJ \frac{\partial^2 y(0, t)}{\partial x^2} = -M_{\text{НО}}, \\ y(H, t) = S(t), \quad EJ \frac{\partial^2 y(H, t)}{\partial x^2} = -M_{\text{ВО}}; \end{aligned} \quad (2)$$

– ограничения на напряженно-деформированное состояние

$$\sigma \leq [\sigma], \quad \varphi_{\text{НО}} \leq [\varphi_{\text{НО}}], \quad \varphi_{\text{ВО}} \leq [\varphi_{\text{ВО}}], \quad l_{\text{ТК}} \leq [l_{\text{ТК}}], \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости материала конструкции ВОК;  $H$  – 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;  $\sigma$  – максимальное эквивалентное напряжение, действующее 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;  $l_{\text{TK}}$  – длина хода телескопического компенсатора;  $[\sigma]$ ,  $[\varphi_{\text{HO}}]$ ,  $[\varphi_{\text{BO}}]$ ,  $[l_{\text{TK}}]$  – допускаемые значения соответствующих величин.

Особенность бурения с плавучих буровых установок на приливно-отливных акваториях заключается в том, что эти плавучие средства постоянно перемещаются по горизонтали относительно устья скважины. Для описания этих перемещений при волнении моря различной интенсивности используем амплитудно-частотные характеристики продольно-поперечных колебаний полупогружной буровой установки (ППБУ) [1].

Моделирование морских нерегулярных волн проводим с помощью конечного числа гармоник, применяя спектр Пирсона-Московица [2]. Расчет гидродинамической нагрузки на ВОК выполняем по формуле Морисона для волн относительно малой амплитуды. Распределение скорости приливно-отливного течения по глубине моря описываем зависимостью [3]:

$$V_{\text{T}} = V_0 \left( \frac{x}{H} \right)^{1/7}, \quad (4)$$

где  $V_0$  – скорость течения на поверхности моря.

Проводя исследование, полагаем, что процесс изменения во времени максимального эквивалентного напряжения  $\sigma$  и угла отклонения  $\varphi_{\text{HO}}$  в нижней опоре является эргодическим и стационарным. Наличие этого свойства означает достаточность одной реализации для оценки характеристик случайного процесса. Значения этих оценок получаем путем статистической обработки результатов вычислительного эксперимента, в котором моделировалась работа ВОК в различных условиях бурения на приливно-отливных акваториях прибрежного шельфа при нерегулярном волнении моря различной интенсивности. С этой целью весь временной интервал проведения вычислительного эксперимента разбивается на равные части, каждая из которых равна  $\Delta t$ . Реализации в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_N$ , равные соответственно  $\sigma(t_1), \sigma(t_2), \dots, \sigma(t_N)$  и  $\varphi_{\text{HO}}(t_1), \varphi_{\text{HO}}(t_2), \dots, \varphi_{\text{HO}}(t_N)$ , используются для вычисления соответствующих оценок. Оценкой математического ожидания случайных величин  $\sigma$  и  $\varphi_{\text{HO}}$  служит среднее арифметическое

$$m_{\sigma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma(t_i); \quad m_{\varphi_{\text{HO}}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varphi_{\text{HO}}(t_i). \quad (5)$$

Оценка стандартного отклонения определяется по формуле

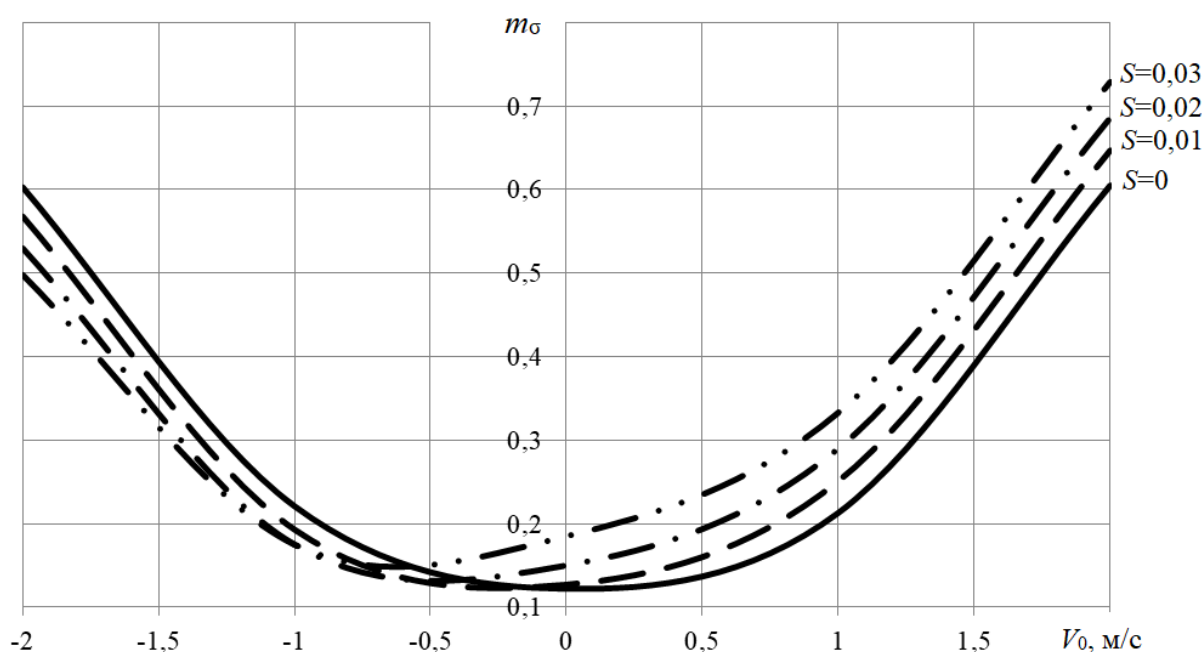
$$d_{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\sigma(t_i) - m_{\sigma}]^2}{N-1}}; \quad d_{\varphi_{\text{HO}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\varphi_{\text{HO}}(t_i) - m_{\varphi_{\text{HO}}}]^2}{N-1}}. \quad (6)$$

Отличительная особенность приливно-отливных акваторий состоит в том, что действующие на них морские течения имеют реверсивный характер, то есть приливное течение направлено постоянно в одну сторону, а отливное течение имеет направление, прямо противоположное приливному. Принимаем, что направление прилива совпадает с положительным направлением оси  $Y$  ( $V_0 > 0$ ), а отлив имеет противоположную направленность ( $V_0 < 0$ ).

В качестве объекта для проведения вычислительного эксперимента была выбрана ВОК, изготовленная из стали 30ХМА. Вес одного метра длины этой конструкции составляет  $3,3 \cdot 10^3$  Н/м, наружный и внутренний диаметры равны 0,610 м и 0,584 м соответственно. Представленные в настоящей статье некоторые результаты (рис. 1-3) проведенного исследо-

вания были получены при следующих исходных данных: плотность бурового раствора – 2500 кг/м<sup>3</sup>; плотность морской воды – 1030 кг/м<sup>3</sup>; внутренние моменты в опорах  $M_{но} = M_{во} = 0$ . Глубина моря  $H$ , относительное (отнесенное к весу ВОК) усилие натяжения  $T$ , относительное (отнесенное к глубине моря) статическое смещение  $S$  плавучей буровой платформы от точки бурения, высота волны трехпроцентной обеспеченности  $h_{3\%}$  и скорость приливно-отливного течения задавались, исходя из возможных условий эксплуатации комплекса подводного устьевого оборудования.

Приведенный на рис. 1 график получен для ВОК, растянутой относительным усилием натяжения  $T=3$ , работающей на приливно-отливной акватории с глубиной моря  $H = 90$  м и высотой волны трехпроцентной обеспеченности  $h_{3\%} = 7$  м нерегулярного морского волнения. На графике представлена зависимость среднего значения  $m_{\sigma}$  относительного (отнесенного к  $[\sigma]$ ) максимального эквивалентного напряжения от скорости приливного ( $V_0 > 0$ ) и отливного ( $V_0 < 0$ ) течений при различных отклонениях  $S$  плавучей буровой платформы от места бурения. Изолинии отклонений  $S = \text{const}$  представляют собой кривые линии, отражающие нелинейную зависимость  $m_{\sigma}$  от скорости приливно-отливного течения выбранного профиля. Они показывают, что напряженное состояние несущего корпуса ВОК существенно зависит от скорости течений в обоих направлениях в рассматриваемом диапазоне  $0 \leq S \leq 0,03$ .



**Рис. 1.** Зависимость  $m_{\sigma}$  от скорости приливно-отливного течения при различных  $S$ :  
 $H=90$  м;  $h_{3\%} = 7$  м;  $T = 3$

Влияние приливного и отливного течений на напряженное состояние колонны проявляется по-разному. Из графика (рис. 1) видно, что любое по силе приливное течение ( $V_0 > 0$ ) всегда приводит к росту  $m_{\sigma}$  по сравнению со случаем, когда оно отсутствует ( $V_0 = 0$ ). При этом, чем больше скорость течения, тем выше уровень максимальных напряжений в конструкции ВОК. При отливе величина  $m_{\sigma}$  меньше, чем при тех же скоростях приливного течения. В случае, когда ППБУ находится над точкой бурения, соответствующая ей изолиния  $S$

$= 0$  практически симметрична относительно вертикальной оси  $m_{\sigma}$  графика. Если сравнивать напряжения, возникающие от воздействия отливного течения, с напряжениями в конструкции, когда оно отсутствует ( $V_0 = 0$ ), можно заметить, что имеет место эффект разгрузки (снижение уровня напряжений) гибкой колонны. Уменьшение  $m_{\sigma}$  ниже уровня, соответствующего  $V_0 = 0$ , происходит при увеличении скорости отливного течения от  $V_0 = 0$  до  $|V_0| \approx 0,8$  м/с и отклонениях  $S=0,01$ ,  $S=0,02$  и  $S=0,03$ . Минимальным значениям  $m_{\sigma}$  при отклонениях платформы  $S=0,01$ ,  $S=0,02$  и  $S=0,03$  соответствуют скорости отлива  $|V_0| \approx 0,3$  м/с,  $|V_0| \approx 0,5$  м/с и  $|V_0| \approx 0,8$  м/с. Такое явление может быть вызвано переходом гибкой колонны от одной криволинейной формы изгиба в потоке морской воды к другой.

Проведенное исследование показало, что влияние приливного и отливного течений на напряженное состояние ВОК, подобное представленному на рис. 1, имеет место и при других значениях глубины моря, интенсивности волнения и усилия натяжения.

Зависимость стандартного отклонения  $d_{\sigma}$  от скорости приливо-отливного течения при тех же глубине и волновом режиме отражено на рис. 2. Из графика следует, что течение обоих направлений существенно влияет на  $d_{\sigma}$ . При этом, чем больше скорость течения (приливного или отливного), тем больше стандартное отклонение. Наименьшие значения стандарта наблюдаются при минимальных скоростях, близких к  $V_0 \approx 0$  при всех  $S$ . Изолинии  $S = 0,01$  и  $S = 0,03$  практически симметричны относительно вертикальной оси  $d_{\sigma}$ . Кривые  $S = 0$  и  $S = 0,02$  такой особенностью не обладают. Они указывают на небольшое замедление роста  $d_{\sigma}$  в области отливного течения по сравнению с приливным.

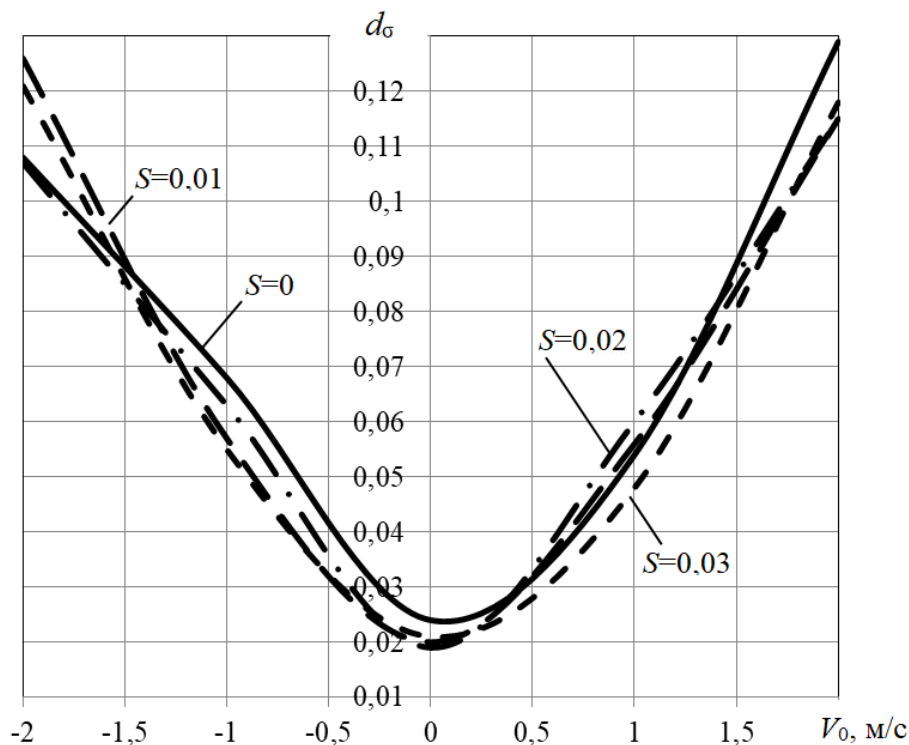


Рис. 2. Зависимость  $d_{\sigma}$  от скорости приливо-отливного течения при различных  $S$ :  
 $H=90$  м;  $h_{3\%}=7$  м;  $T=3$

На рис. 3 представлен график зависимости среднего угла  $m_{\varphi_{\text{но}}}$  отклонения оси ВОК от вертикали в нижней опоре от скорости приливно-отливного течения для различных  $S$  при глубине моря  $H=90$  м, относительном натяжении колонны  $T=5$  и высоте волны  $h_{3\%}=5$  м. График показывает, что величину и знак  $m_{\varphi_{\text{но}}}$  определяют скорость и направление морского течения, а также величина статической составляющей смещения  $S$ . Зависимость  $m_{\varphi_{\text{но}}}$  от скорости приливно-отливного течения имеет нелинейный характер для всех  $S$  из рассматриваемого диапазона.

Как следует из графика (рис. 3), приливное течение всегда приводит к увеличению  $m_{\varphi_{\text{но}}}$  при всех  $S$  по сравнению со случаем, когда течение отсутствует. Прилив вызывает только положительные значения  $m_{\varphi_{\text{но}}}$ . При этом чем больше скорость течения, тем больше величина среднего угла отклонения оси колонны в нижней опоре.

В отличие от прилива, отлив вызывает меньшие по модулю средние углы, чем при тех же скоростях во время прилива, при всех  $S \neq 0$ . В случае нахождения ППБУ над точкой бурения ( $S=0$ ) значения  $m_{\varphi_{\text{но}}}$  по модулю совпадают для течений обоих направлений.

При отсутствии этих течений любое смещение платформы относительно места расположения подводной скважины влечет за собой отклонение оси ВОК от вертикали в нижней опоре. В этих условиях увеличение статической составляющей смещения  $S$  платформы вызывает рост  $m_{\varphi_{\text{но}}}$  при любой интенсивности волнения моря.

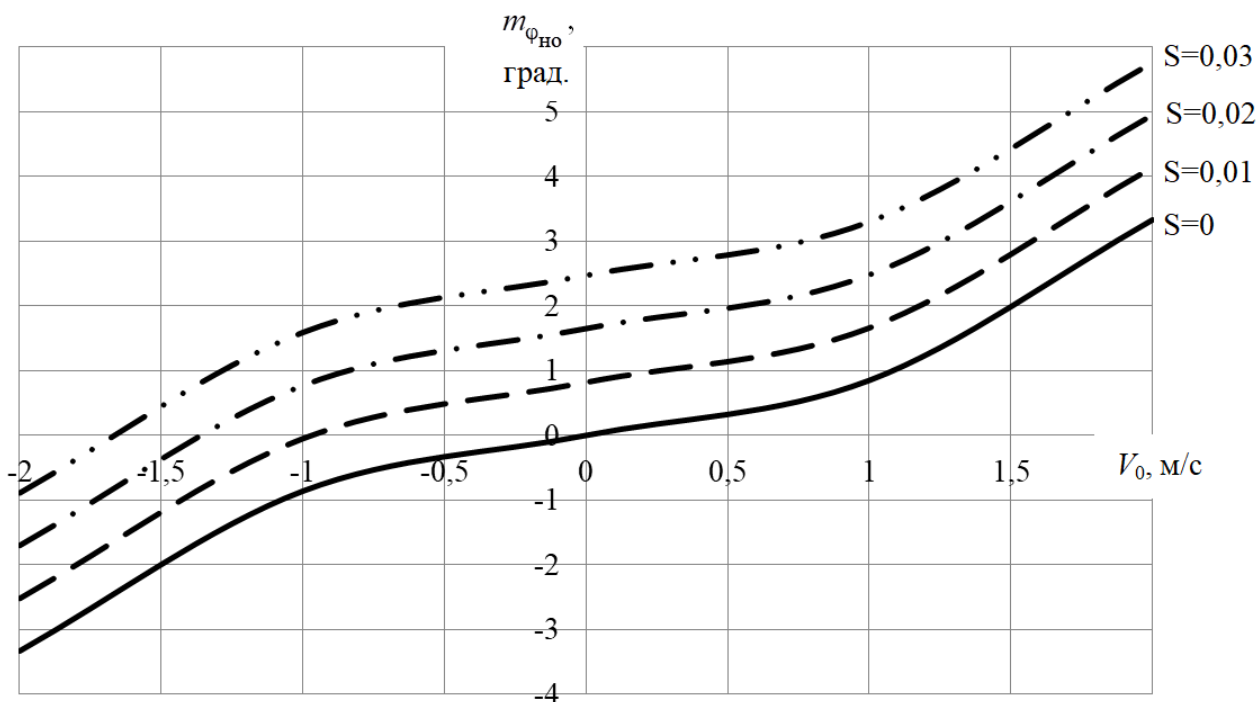


Рис. 3. Зависимость  $m_{\varphi_{\text{но}}}$  от скорости приливно-отливного течения при различных  $S$ :

$$H=90 \text{ м}; T=5; h_{3\%}=5 \text{ м}$$

В результате проведенного исследования была получена серия графиков, аналогичных представленным на рис. 1-3. Они дают полную информацию о напряженно-деформированном состоянии ВОК при проведении буровых работ на приливно-отливных

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 результаты могут представлять интерес для организаций, связанных с проектированием и эксплуатацией комплекса подводно-устьевого оборудования для добычи нефти и газа на континентальном шельфе морей и океанов.

### *Библиографический список*

1. 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.
2. Бородай, И.К. Мореходность судов: Методы оценки [Текст] / И.К. Бородай, Ю.А. Нецветаев. – Л.: Судостроение, 1982. – 288 с.
3. Доусон, Т. Проектирование сооружений морского шельфа [Текст] / Т. Доусон – Л.: Судостроение, 1982. – 288 с.