

УДК 622.24.05:629.12.74:622.242:539.4

Е.Н. Горбиков

**ОПТИМИЗАЦИЯ НАТЯЖЕНИЯ МОРСКОГО СТОЯКА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведена математическая формулировка задачи оптимизации натяжения морского стояка, включающая уравнение динамики гибкой конструкции, ограничения на напряженно-деформированное состояние несущего корпуса стояка и оптимизируемый функционал. Представлены результаты решения поставленной задачи оптимизации для конкретных условий морского бурения.

*Ключевые слова:* морской стояк, усилие натяжения, полупогружная буровая установка, напряженно-деформированное состояние, интенсивность морского волнения.

Морской стояк (МС) является наиболее важным элементом комплекса подводного устьевого оборудования, предназначенного для разработки нефтегазовых месторождений с плавучих платформ полупогружного типа и буровых судов. Стояк связывает надводное плавучее сооружение с подводным стволом скважины. Он служит для управляемого спуска в забой бурильного инструмента, отвода бурового раствора на очистку и погружения обсадной колонны.

Конструкция стояка представляет собой длинномерный тонкостенный трубопровод, состоящий из высокопрочных стальных секций, собранных с помощью специальных муфт в единое целое. Внизу МС соединен через шаровой (угловой) компенсатор и гидравлический соединитель с противовыбросовым оборудованием, закрепленным на дне моря. Нижняя опора обеспечивает компенсацию угловых перемещений стояка, вызванных его изгибом в нестационарном потоке окружающей жидкости и горизонтальными перемещениями надводного плавучего сооружения. В верхней части он оснащен шаровым и телескопическим компенсаторами с системой натяжителей, находящихся на плавучей полупогружной буровой установке (ППБУ). Верхняя опора исключает влияние качки буровой платформы на напряженно-деформированное состояние гибкого трубопровода.

Технология морского бурения предъявляет повышенные требования к прочности корпуса стояка и соблюдению ограничений на перемещения, совершаемые его гибкой конструкцией в штормовых условиях открытого моря. Во время эксплуатации МС подвергается воздействию внешнего и внутреннего гидростатических давлений, нестационарной гидродинамической нагрузки со стороны морских волн и течений, растягивающего усилия натяжения, приложенного к верхней части стояка, собственного веса трубопровода и веса бурового раствора, заполняющего его внутреннюю полость. Учет комплексного влияния всех перечисленных силовых факторов на объект исследования делает задачу расчета его напряженно-деформированного состояния достаточно сложной.

Как показывает зарубежный и отечественный опыт эксплуатации комплекса подводного устьевого оборудования, наиболее сложной проблемой является обеспечение прочности гибкой конструкции стояка и удержание его угловых отклонений в опорах в рамках допустимого диапазона, определяемого технологией подводного бурения с плавучих буровых платформ и судов. По причине разрушения несущего корпуса МС и поломки его опор происходит наибольшее количество простоев технологического оборудования.

В качестве возможного пути повышения надежности и безопасности эксплуатации МС может использоваться оптимизация растягивающего усилия (натяжения), приложенного к его верхнему концу.

Целью настоящего исследования является определение оптимального натяжения МС, обеспечивающего минимальный уровень напряжений в трубопроводе, при выполнении ограничений на его линейные и угловые перемещения в условиях нерегулярного морского волнения и приливного течения.

Конструкцию МС схематизируем балкой с малой жесткостью на изгиб, растянутой осевой силой  $T$  и погруженной в подвижный слой жидкости конечной глубины  $H$ . Балка имеет постоянное по длине поперечное сечение в форме кольца, лежит на двух шарнирных опорах и заполнена внутри буровым раствором. Верхняя подвижная опора допускает как угловые, так и линейные перемещения балки. Нижняя неподвижная шарнирная связь позволяет только угловые перемещения.

Величину прогиба стояка считаем малой по сравнению с его длиной, что обеспечивается необходимым натяжением трубопровода и системой позиционирования буровой платформы, ограничивающей ее горизонтальные перемещения относительно точки бурения. Принимаем, что векторы скорости набегающего потока окружающей жидкости, смещения ППБУ и упругая линия конструкции лежат в одной плоскости. Колебания МС в нестационарном потоке жидкости рассматриваем в неподвижной системе координат  $XOY$ , начало которой совпадает с нижней опорой стояка. Ось  $OX$  направлена вертикально вверх,  $OY$  – горизонтально вправо.

Математическая формулировка рассматриваемой оптимизационной задачи имеет следующий вид:

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

$$\psi = \min_{T \in D_T} \Phi(T), \quad \Phi = \max_{x \in [0, H]} m_\sigma(x, T, t),$$

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

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

$$\sigma_3 \leq [\sigma], \quad \varphi_{\text{но}} \leq [\varphi_{\text{но}}], \quad \varphi_{\text{во}} \leq [\varphi_{\text{во}}], \quad l_{\text{тк}} \leq [l_{\text{тк}}].$$

Здесь  $y(x, t)$  – прогиб конструкции МС;  $x$  – координата поперечного сечения трубопровода;  $t$  – время;  $a, b, c, f, k, n$  – коэффициенты при производных, зависящие от геометрических, жесткостных и весовых параметров конструкции МС, усилия натяжения  $T$  и плотности бурового раствора;  $q(x, t)$  – погонная гидродинамическая нагрузка на гибкий трубопровод со стороны набегающего нестационарного потока окружающей жидкости;  $m_\sigma$  – среднее значение максимального эквивалентного напряжения, возникающего в несущем корпусе МС;  $\sigma_3$  – эквивалентное напряжение;  $D_T$  – область допустимых натяжений  $T$ ;  $E$  – модуль упругости материала конструкции МС;  $J$  – момент инерции площади поперечного сечения стояка;  $M_{\text{но}}, M_{\text{во}}$  – внутренние моменты в нижней и верхней опорах, обусловленные их конструктивным исполнением;  $S(t)$  – горизонтальное перемещение ППБУ относительно точки бурения;  $\varphi_{\text{но}}, \varphi_{\text{во}}$  – углы отклонения осевой линии МС от вертикали в нижней и верхней опорах, соответственно;  $l_{\text{тк}}$  – длина хода телескопического компенсатора;  $[\sigma], [\varphi_{\text{но}}], [\varphi_{\text{во}}], [l_{\text{тк}}]$  – допускаемые значения соответствующих величин.

Для моделирования горизонтальных перемещений  $S(t)$  плавучей буровой платформы при волнении различной интенсивности использовались амплитудно-частотные характеристики продольно-поперечных колебаний заякоренной ППБУ [1]. Описание нерегулярного

волнения моря проводилось с помощью конечного числа гармоник, применяя в качестве расчетного волновой спектр Пирсона – Московича в форме [2]:

$$S(\omega) = \frac{1}{4\pi\omega} h_{1/3}^2 \left( \frac{\bar{\omega}}{\omega} \right)^5 \exp \left[ -\frac{1}{\pi} \left( \frac{\bar{\omega}}{\omega} \right)^4 \right],$$

где  $h_{1/3}$  – значительная высота волн;  $\bar{\omega}$  – средняя частота нерегулярных волн;  $\omega$  – текущее значение частоты.

Расчет гидродинамической нагрузки на МС выполнялся по известной формуле Морисона для волн малой амплитуды с учетом скорости стационарного приливного течения и подвижности обтекаемой гибкой конструкции стояка.

Изменение скорости приливного течения по высоте МС описывалось зависимостью [3]:

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

где  $V_0$  – скорость приливного течения на поверхности моря.

В качестве объекта исследования был выбран МС, изготовленный из стали 30ХМА с пределом текучести 750 МПа. Погонный вес его конструкции составляет  $3,3 \cdot 10^3$  Н/м, наружный и внутренний диаметры несущей трубы – 0,610 и 0,584 м, соответственно. Испытания проводились при следующих исходных данных: плотность бурового раствора – 2500 кг/м<sup>3</sup>; плотность морской воды – 1030 кг/м<sup>3</sup>; моменты в опорах  $M_{HO} = M_{BO} = 0$ .

Расчеты на ПЭВМ позволили получить серию графиков, показывающих влияние усилия натяжения МС на напряженно-деформированное состояние его конструкции в зависимости от интенсивности нерегулярного волнения при различных скоростях приливного течения и статических перемещениях ППБУ относительно подводного устья скважины. Некоторые результаты проведенных исследований приведены на рис. 1 – рис. 4.

На рис. 1 представлены графики зависимости средних значений относительных максимального эквивалентного напряжения  $m_\sigma$  (относительное эквивалентное напряжение  $\bar{\sigma}_s = \sigma_s / [\sigma]$ ) и угла отклонения  $m_{\varphi_{HO}}$  в нижней опоре (относительный угол в нижней опоре  $\bar{\varphi}_{HO} = \varphi_{HO} / [\varphi_{HO}]$ ) от относительного (отнесенного к весу трубопровода) натяжения  $\bar{T}$  стояка.

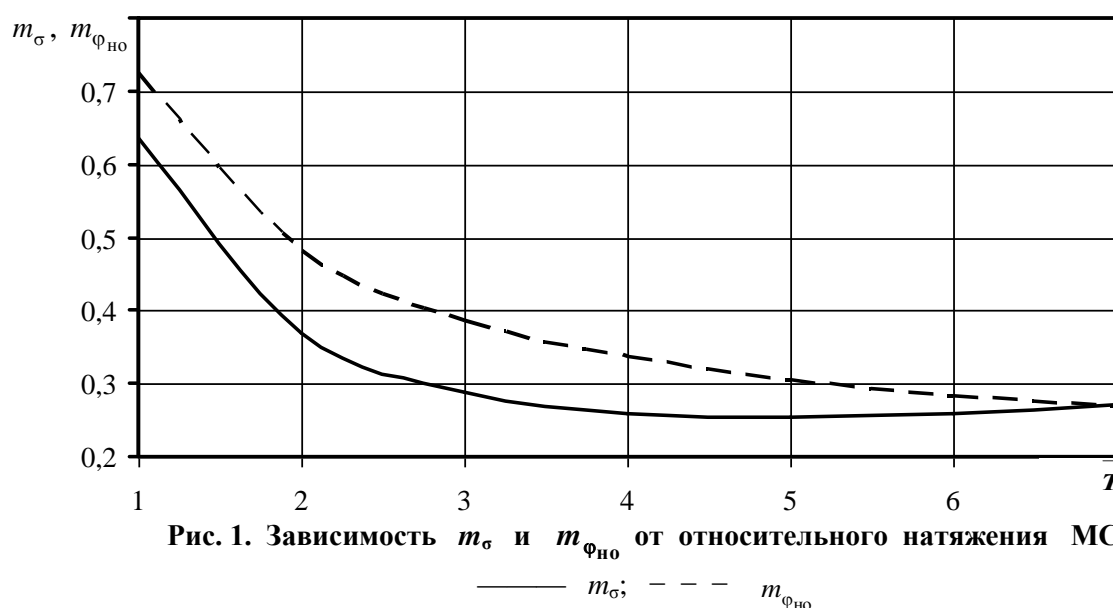


Рис. 1. Зависимость  $m_\sigma$  и  $m_{\varphi_{HO}}$  от относительного натяжения МС:

—  $m_\sigma$ ; - - -  $m_{\varphi_{HO}}$

Приведенные на рис.1 кривые изменения  $m_\sigma$  и  $m_{\varphi_{HO}}$  получены для глубины моря 75 м

при высоте волны трехпроцентной обеспеченности  $h_{3\%} = 6$  м, статическом смещении ППБУ, составляющем 3% от глубины моря, и поверхностной скорости приливного течения 1 м/с. Направления векторов течения, волнового потока и статического смещения буровой платформы совпадали.

Из графика видно, что с ростом усилия натяжения в диапазоне  $1 \leq \bar{T} \leq 5$  наблюдается резкое снижение уровня  $m_{\sigma}$  в несущем корпусе стояка. Это объясняется уменьшением доли изгибных напряжений в общем напряженном состоянии конструкции. В окрестности  $\bar{T} = 5$  кривая изменения  $m_{\sigma}$  имеет минимум, соответствующий оптимальному значению усилия натяжения  $\bar{T}_{\text{опт}}$  при заданных условиях. Дальнейший рост натяжения до  $\bar{T} = 7$  приводит к незначительному увеличению напряженности гибкого трубопровода за счет возрастающих растягивающих напряжений в его конструкции. Область натяжений, расположенных правее  $\bar{T}_{\text{опт}}$ , позволяет маневрировать усилием  $\bar{T}$ , не вызывая существенного увеличения напряжений в трубопроводе, и выбирать углы поворота конструкции в опорных закреплениях, исходя из конкретных условий состояния моря.

Кривая изменения  $m_{\phi_{\text{но}}}$  указывает на существенное уменьшение угла в нижней опоре во всем диапазоне роста  $\bar{T}$ . Из графика следует, что режим бурения ( $[\phi_{\text{но}}] = 5^{\circ}$ ) допустим только при  $\bar{T} \geq 2$ . При меньших натяжениях бурение прекращается и ППБУ переходит в режим штормового отстоя ( $[\phi_{\text{но}}] = 10^{\circ}$ ).

На рис. 2 приведены графики зависимости оптимального натяжения  $\bar{T}_{\text{опт}}$  от относительного (отнесенного к глубине  $H$  моря) статического смещения  $\bar{S}$  буровой платформы при высотах волн  $h_{3\%} \leq 6$  м, глубине моря 75 м и скоростях приливного течения  $V_0 = 0$ ,  $V_0 = 1$  м/с. Проведенные расчеты показали, что при совпадении направлений векторов скоростей течения, волнового потока и статического смещения ППБУ высота морских волн практически не влияет на величину  $\bar{T}_{\text{опт}}$  на рассматриваемой глубине.

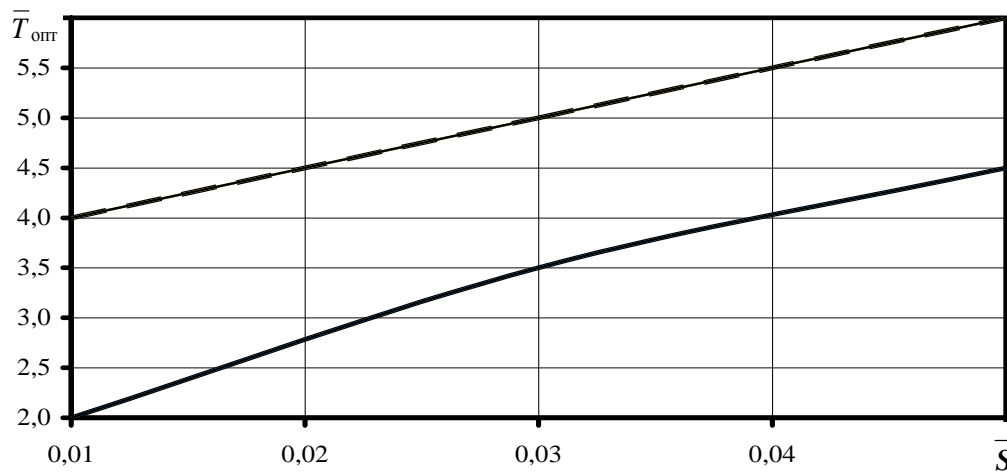
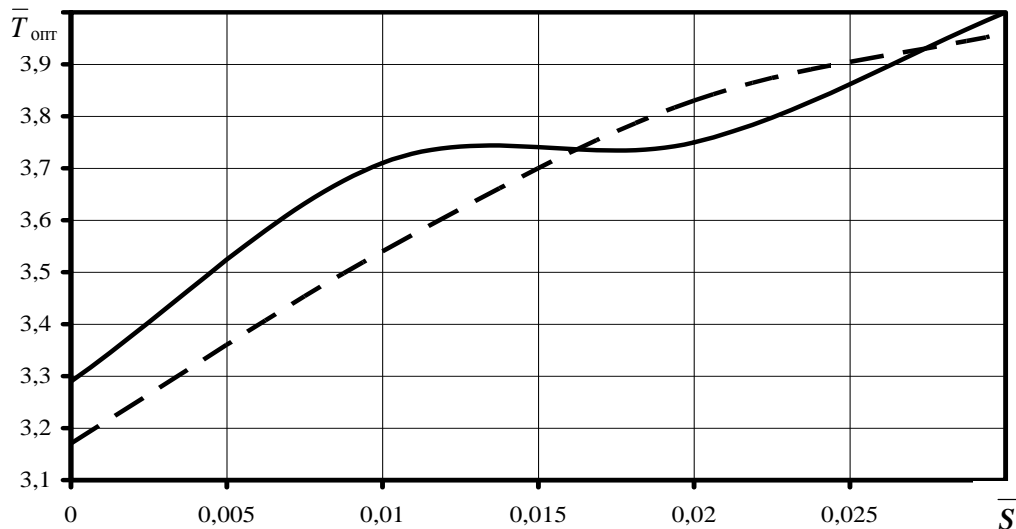


Рис. 2. Зависимость оптимального относительного натяжения от относительного статического смещения ППБУ при глубине моря 75 м:

—  $V_0 = 0$ , - - - -  $V_0 = 1$  м/с

Из графиков видно, что величину  $\bar{T}_{\text{опт}}$  определяют скорость  $V_0$  течения и статическое смещение  $\bar{S}$  буровой установки. Зависимость усилия  $\bar{T}_{\text{опт}}$  от смещения  $\bar{S}$  буровой установки имеет линейный характер как для скорости течения  $V_0 = 1$  м/с, так и в случае, когда приливное течение отсутствует. Увеличение скорости течения приводит к росту значений оптимального натяжения МС.

На рис. 3 показаны кривые изменения  $\bar{T}_{\text{опт}}$  от смещения ППБУ при глубине моря 120 м и различных значениях высоты набегающих волн ( $3 \text{ м} \leq h_{3\%} \leq 8 \text{ м}$ ). Изучалось влияние направления волнового потока на выбор  $\bar{T}_{\text{опт}}$ . Рассматривались два случая: 1) волновой поток совпадает по направлению с приливным течением и статическим смещением ППБУ; 2) волновой поток направлен противоположно приливному течению и статическому смещению платформы.



**Рис. 3. Зависимость оптимального относительного натяжения от относительного статического смещения ППБУ при глубине моря 120 м:**

- направление волнового потока не совпадает с направлениями течения и статического смещения ППБУ,
- - - направление волнового потока совпадает с направлениями течения и статического смещения ППБУ

Вычислительный эксперимент показал, что в обоих случаях высота волн не оказывает существенного влияния на величину  $\bar{T}_{\text{опт}}$ . В то же время, расположение ППБУ относительно точки бурения заметно влияет на оптимальную величину растягивающего усилия вне зависимости от направления распространения морских волн. В первом случае зависимость оптимального натяжения от статического отклонения ППБУ близка к линейной, отражающей рост  $\bar{T}_{\text{опт}}$  при увеличении статической составляющей дрейфа буровой платформы. Во втором случае аналогичная зависимость носит нелинейный характер. Особенность последнего графика заключается в том, что он состоит из двух ветвей, отражающих рост  $\bar{T}_{\text{опт}}$  с увеличением отклонений ППБУ от точки бурения в диапазонах  $0 \leq \bar{S} \leq 0,01$  и  $0,02 \leq \bar{S} \leq 0,03$ . В области смещений  $0,01 < \bar{S} < 0,02$  обе ветви соединены отрезком кривой, в пределах которой оптимальное натяжение практически не изменяется. Существование такого участка с постоянным  $\bar{T}_{\text{опт}}$  может быть вызвано переходом гибкого трубопровода от одной криволинейной формы равновесия к другой.

Из графика (рис. 3) видно, что при удержании ППБУ над точкой бурения ( $\bar{S}=0$ ) противоположная направленность распространения морских волн и приливного течения требует большего значения оптимального натяжения по сравнению со случаем их совпадения.

Помимо величины оптимального натяжения практический интерес представляют соответствующие  $\bar{T}_{\text{опт}}$  углы отклонения осевой линии МС от вертикали в нижнем и верхнем шаровых компенсаторах. На рис. 4 изображены зависимости среднего значения угла  $m_{\phi_{\text{ню}}}$

поворота оси МС в нижней опоре от высоты волны  $h_{3\%}$  ( $3 \text{ м} \leq h_{3\%} \leq 8 \text{ м}$ ) для трех значений  $\bar{S}$  при работе стояка в области оптимальных натяжений на глубине моря 120 м с поверхностной скоростью приливного течения  $V_0 = 1 \text{ м/с}$ .

Изолинии  $\bar{S} = 0,01$ ,  $\bar{S} = 0,02$  и  $\bar{S} = 0,03$  представляют собой прямые линии, отражающие линейную зависимость угла  $m_{\phi_{\text{но}}}$  от высоты волны  $h_{3\%}$ . Приращение  $m_{\phi_{\text{но}}}$  при увеличении высоты волны  $h_{3\%}$ , является незначительным при всех рассмотренных отклонениях  $\bar{S}$  платформы.

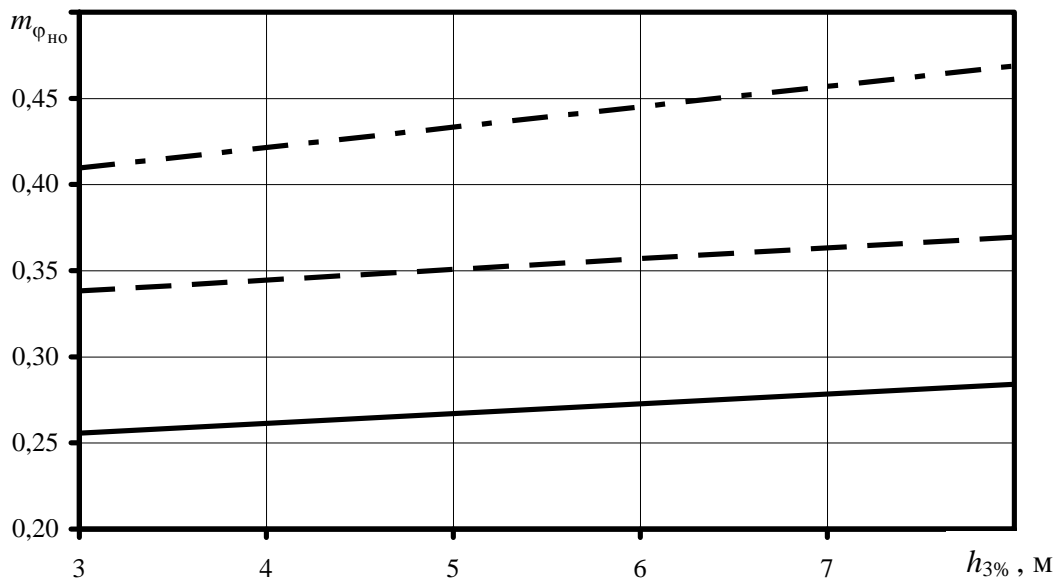


Рис. 4. Зависимость  $m_{\phi_{\text{но}}}$  от высоты волны  $h_{3\%}$  и относительного статического смещения ППБУ при  $\bar{T}_{\text{опт}}$ , глубине моря 120 м и скорости  $V_0 = 1 \text{ м/с}$ :  
 —  $\bar{S} = 0,01$ ; - - -  $\bar{S} = 0,02$ ; - · - · -  $\bar{S} = 0,03$

В отличие от высоты волны влияние статического отклонения ППБУ от точки бурения на величину угла  $m_{\phi_{\text{но}}}$  является более заметным. Большему смещению  $\bar{S}$  соответствует большее значение угла  $m_{\phi_{\text{но}}}$  в нижней опоре МС.

В результате проведенного исследования была получена серия графиков, аналогичных показанным на рис. 1 – рис. 4. Они дают полную информацию о напряженно-деформированном состоянии несущего корпуса МС как при оптимальных, так и не оптимальных натяжениях. На основании этих графиков могут быть выработаны практические рекомендации по выбору величины оптимального натяжения гибкого трубопровода в зависимости от интенсивности морского волнения, глубины моря, скорости приливного течения и статической составляющей отклонения ППБУ от места бурения.

Полученные результаты могут представлять интерес для организаций, связанных с проектированием и эксплуатацией комплекса подводного устьевоего оборудования для добычи нефти и газа на континентальном шельфе.

#### Библиографический список

1. **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.

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

*Дата поступления  
в редакцию 03.02.2014*

**E.N. Gorbikov**

## **OPTIMIZATION OF THE MARINE RISER TENSION**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev

**Purpose:** Determination of the optimal tension of the marine riser, which provides a minimum level of stresses in the pipeline, with the implementation of restrictions on linear and angular movements in conditions of irregular sea waves and tidal currents.

**Design/methodology/approach:** The mathematical formulation of the optimization of the marine riser tension, including the dynamic equation of the flexible design, the restrictions on the stress-strain state of the body riser and optimized functional.

**Findings:** As a result of the conducted researches can be formulated practical recommendations about a choice of size of an optimum tension of the flexible pipeline depending on intensity of sea excitement, depth of the sea, speed of a tidal current and a static component of a deviation of semi-submersible drilling platform from a drilling place.

**Originality/value:** The obtained results may be of interest to organizations associated with the design and operation of process equipment for oil and gas on the continental shelf.

*Key words:* marine riser, tension force, semi-submersible drilling platform, stress-strain state, intensity of sea waves.