

УДК 622.24.05:629.12.74:622.242:539.4

Е.Н. Горбиков
ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ПЛАВУЧЕГО СРЕДСТВА ОТ МЕСТА
БУРЕНИЯ И НАТЯЖЕНИЯ МОРСКОГО ТРУБОПРОВОДА
НА ЕГО УГЛОВЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В ОПОРАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены уравнение динамики гибкой конструкции морского трубопровода в условиях нерегулярного волнения моря и ограничения на его напряженно-деформированное состояние. Представлены отдельные результаты вычислительного эксперимента по определению угловых перемещений в опорах длинномерного морского трубопровода для конкретных условий морского бурения.

Ключевые слова: морское бурение, комплекс подводного устьевого оборудования, морской стояк, усилие натяжения, надводное плавучее сооружение.

Бурение скважин в открытом море требует принципиально новых конструкций бурового оборудования и технологий, существенно отличающихся от применяемых на суше. Разведка и разработка морских нефтяных и газовых месторождений включает проведение технически сложных и дорогостоящих операций, связанных со значительным риском. При этом весь технологический комплекс должен обеспечивать непрерывность добычи углеводородов и окупаемость капитальных вложений. Поэтому проблема обеспечения безопасности и надёжности – одна из важнейших при проведении буровых работ в открытом море.

В современной практике бурения скважин с надводных плавучих сооружений (плавучие полупогружные установки (ППБУ), буровые суда (БС)) широко применяют комплексы подводного устьевого оборудования (ПУО), устанавливаемые на морском дне. Такое расположение допускает смещение плавучего средства относительно точки бурения, а установленное на морском дне оборудование меньше подвержено риску механического повреждения. Одним из наиболее важных и ответственных элементов комплекса ПУО является морской трубопровод (морской стояк (МС)). Его гибкая конструкция связывает надводное плавучее сооружение с подводным стволом скважины. Стояк представляет собой тонкостенный длинномерный трубопровод, опирающийся на две шаровые опоры и растянутый продольной силой (усилием натяжения). Он необходим для обеспечения гибкой замкнутой технологической связи между подвижным надводным плавучим сооружением и неподвижным донным устьем скважины, направления в скважину бурильного инструмента и обеспечения замкнутой циркуляции бурового раствора. С его помощью осуществляют глушение скважины с целью предотвращения возможного выброса нефти при аварийных ситуациях или отсоединение МС в случае сильного шторма.

Особенность бурения с ППБУ и БС на приливно-отливных акваториях заключается в том, что эти плавучие средства постоянно смещаются по горизонтали относительно места бурения, что может вызвать опасное провисание МС и привести к заклиниванию или разрушению его опор. Конструктивно опоры морского трубопровода представляют собой шаровые соединения. Нижняя опора (НО) находится на неподвижном подводном устьевом оборудовании и обеспечивает компенсацию угловых перемещений трубопровода от изгиба его несущего корпуса в нестационарном потоке набегающей жидкости и горизонтальных перемещений ППБУ или БС. Верхняя опора (ВО) располагается на надводном плавучем сооружении и оснащена телескопическим компенсатором. Она, как и НО, компенсирует угловые отклонения МС в опорах, вызванные различными видами качки надводных плавучих средств. Каждая опора обладает собственным внутренним моментом $M_{но}$ и $M_{во}$, обусловленным их конструктивным исполнением.

Практика бурения скважин в специфических гидрометеорологических условиях открытого моря показывает, что наиболее сложной проблемой является обеспечение прочности гибкой конструкции стояка и удержание угловых отклонений его оси от вертикали в обеих опорах в рамках допустимого диапазона, определяемого технологией подводного бурения с плавучих платформ и судов.

Целью настоящего исследования является изучение влияния усилия натяжения стояка и горизонтального отклонения надводного плавучего сооружения от места бурения скважины на его угловые перемещения в опорах. Необходимым условием при этом служит обеспечение безопасного уровня напряжений в несущем корпусе трубопровода. Конструкцию МС схематизируем упругой балкой с малой жёсткостью на изгиб, растянутой осевой силой 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 трубопровода считаем малой по сравнению с его длиной, что обеспечивается необходимым натяжением трубопровода и системой позиционирования плавучей буровой платформы, ограничивающей её горизонтальные перемещения относительно точки бурения скважины. Принимаем, что векторы скорости набегающего потока окружающей жидкости, перемещения ППБУ и упругая линия конструкции лежат в одной плоскости XU . Начало системы координат XU размещаем в НО стояка на уровне дна моря, считая её совпадающей с точкой бурения, ось X направляем вертикально вверх, а ось U – горизонтально вправо.

Динамику МС в открытом море описываем дифференциальным уравнением в частных производных:

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

где $y(x, t)$ – 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 характеристик конструкции трубопровода, усилия натяжения и плотности бурового раствора; $q(x, t)$ – интенсивность гидродинамической нагрузки, действующей на гибкий трубопровод со стороны набегающего нестационарного потока окружающей жидкости.

Решение уравнения должно удовлетворять:

1) граничным условиям:

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

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

2) начальным условиям движения комплекса «ППБУ–МС»;

3) ограничениям на напряженно-деформированное состояние корпуса стояка:

$$\sigma_3 \leq [\sigma], \quad \varphi_{\text{НО}} \leq [\varphi_{\text{НО}}], \quad \varphi_{\text{ВО}} \leq [\varphi_{\text{ВО}}], \quad l_{\text{ТК}} \leq [l_{\text{ТК}}].$$

Здесь E – модуль упругости материала конструкции МС; J – момент инерции площади поперечного сечения стояка; $M_{\text{НО}}, M_{\text{ВО}}$ – внутренние моменты в НО и ВО, обусловленные их конструктивным исполнением, соответственно; σ_3 – максимальное эквивалентное напряжение в несущем корпусе стояка; $S(t)$ – горизонтальное перемещение ППБУ относительно точки бурения; $\varphi_{\text{НО}}, \varphi_{\text{ВО}}$ – максимальные углы отклонения оси МС от вертикали в НО и ВО соответственно; $l_{\text{ТК}}$ – максимальная длина хода телескопического компенсатора; $[\sigma], [\varphi_{\text{НО}}], [\varphi_{\text{ВО}}], [l_{\text{ТК}}]$ – допускаемые значения соответствующих величин.

Предполагаем, что влиянием начальных условий на напряженно-деформированное состояние МС можно пренебречь. Для описания горизонтальных перемещений $S(t)$ плавучей платформы на нерегулярном волнении используем амплитудно-частотные характеристики

продольно-поперечных колебаний ППБУ [1]. Моделирование морских нерегулярных волн проводим с помощью конечного числа гармоник, применяя спектр Пирсона-Московица 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; ω – текущее значение частоты.

Расчёт гидродинамической нагрузки на гибкую конструкцию стояка выполняем по формуле Морисона для волн относительно малой амплитуды. Распределение скорости приливного течения по глубине моря описываем зависимостью [3]:

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

где V_0 – скорость 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. Представленные в настоящей работе результаты были получены при следующих исходных данных: плотность бурового раствора – 2500 кг/м³; плотность морской воды – 1030 кг/м³; моменты в опорах $M_{но} = M_{во} = 0$.

Проведённый вычислительный эксперимент позволил получить серию графиков, показывающих влияние статической составляющей горизонтальных перемещений ППБУ относительно места бурения подводной скважины и усилия натяжения стояка на углы поворота опорных сечений его гибкой конструкции. Рассматривался случай работы комплекса ПУО на приливо-отливных акваториях различной глубины с разной интенсивностью морского волнения и скоростью приливного течения. Некоторые результаты проведённых исследований приведены на рис. 1-3.

На рис. 1 представлен график зависимости средних значений относительных углов m_φ (отнесённых к допускаемой величине угла $[\varphi] = 5^\circ$, одинакового для обеих опор) поворота опорных сечений МС от относительного статического смещения S (смещения платформы, отнесённого к глубине H моря) при относительном усилии натяжения (отнесённом к весу несущего трубопровода) $T=5$.

Приведённый на рис.1 график был получен для приливо-отливной акватории с глубиной моря $H=50$ м и высотой волны трёхпроцентной обеспеченности $h_{3\%} = 5$ м нерегулярного волнения. Направление распространения волн совпадало с положительным направлением оси Y . Статическое отклонение ППБУ от места бурения происходило как в положительном (вправо относительно точки бурения), так и в отрицательном (влево относительно точки бурения) направлении оси Y . Рассматривалось приливное течение двух направлений: вектор скорости приливного течения совпадал с вектором волнового потока (попутное течение) или был ему противоположен (встречное течение). Поверхностная скорость приливного течения принималась равной $V_0 = 1$ м/с и $V_0 = -1$ м/с соответственно.

Из графика (рис. 1) видно, что расположение плавучего средства относительно места бурения скважины существенно влияет на величину $m_{\varphi_{но}}$ и $m_{\varphi_{во}}$. Зависимости $m_{\varphi_{но}}$ и $m_{\varphi_{во}}$ от S имеют явно выраженный линейный характер. В случае нахождения ППБУ над точкой бурения ($S=0$) значения $m_{\varphi_{но}}$ и $m_{\varphi_{во}}$ отличны от нуля, что обусловлено действием приливного течения на МС, а знаки углов определяются его направлением. При $S=0$ и попутном с волнами течении $m_{\varphi_{но}} > 0$, а $m_{\varphi_{во}} < 0$; при встречном течении $m_{\varphi_{но}} < 0$, а $m_{\varphi_{во}} > 0$. В каждом из обоих случаев значения самих средних углов в НО и ВО практически совпадают по модулю, что обусловлено спецификой распределения профиля скоростей приливного течения по глубине

моря. Что касается направления морского прилива, то линии изменения $m_{\varphi_{НО}}$ и $m_{\varphi_{ВО}}$ при $V_0 = 1$ м/с и $V_0 = -1$ м/с указывают на существенное влияние направления скорости приливного течения на знаки и величины соответствующих углов.

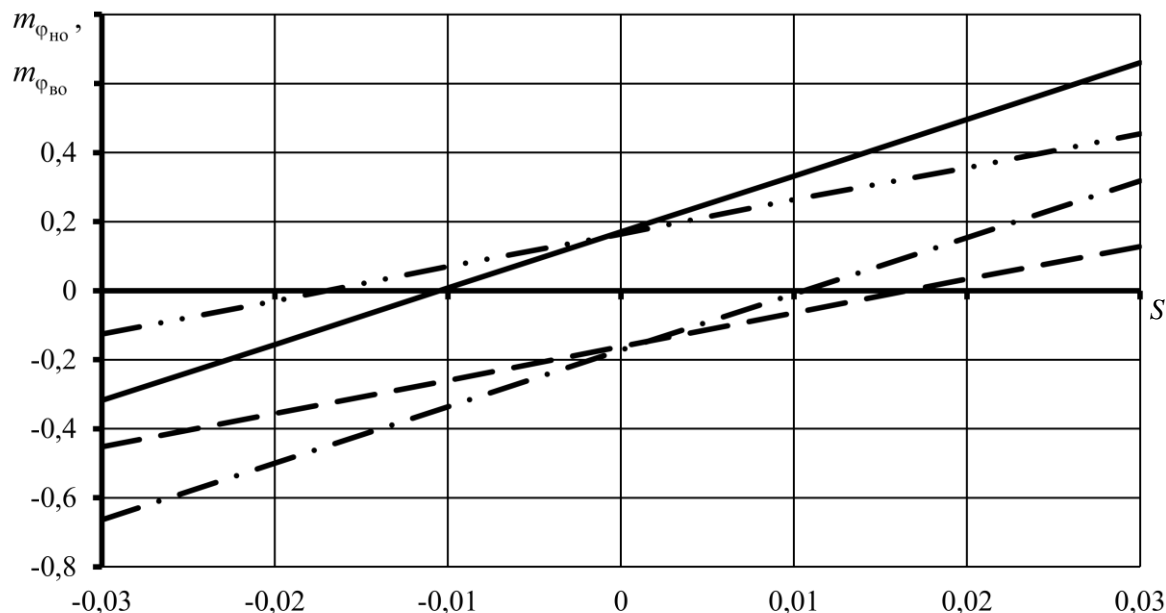


Рис. 1. Зависимость m_{φ} в опорах от относительного смещения ППБУ при $T=5$, $H=90$ м; $h_{3\%}=5$ м, $V_0=1$ м/с и $V_0=-1$ м/с:

— в НО при $V_0=1$ м/с; - - - в ВО при $V_0=1$ м/с;
 - · - · в НО при $V_0=-1$ м/с; - · · - · в ВО при $V_0=-1$ м/с

Проведённые исследования показали, что изменения $m_{\varphi_{НО}}$ и $m_{\varphi_{ВО}}$ в зависимости от смещения S при других значениях растягивающего усилия ($3 \leq T \leq 7$) также описываются линейной зависимостью и имеет вид, аналогичный представленному на рис. 1. Было установлено, что высота волны $h_{3\%}$ не оказывает какого-либо заметного влияния на угловые перемещения морского трубопровода в опорах. В отличие от высоты волны расположение ППБУ относительно точки бурения существенно влияет на величину углов $m_{\varphi_{НО}}$ и $m_{\varphi_{ВО}}$ при любом постоянном натяжении конструкции, выбранном из рассмотренного ряда растягивающих усилий.

На рис. 2 и 3 представлены графики изменения m_{φ} в опорах гибкой конструкции в зависимости от величины натяжения T при четырёх вариантах статического смещения S плавучей платформы в положительном направлении оси Y относительно точки бурения. Направления векторов приливного течения и волнового потока также совпадали с положительным направлением оси Y . Приведённые на графиках (рис. 2 и 3) результаты расчётов $m_{\varphi_{НО}}$ и $m_{\varphi_{ВО}}$ получены для волнения моря с $h_{3\%}=7$ м, поверхностной скорости приливного течения $V_0 = 1$ м/с и глубины акватории $H=150$ м.

Анализ графика (рис. 2) изменения средних углов отклонения оси МС от вертикали в НО показал, что увеличение натяжения T приводит к плавному, но заметному уменьшению $m_{\varphi_{НО}}$ во всех рассмотренных вариантах положительных отклонений S . Это обусловлено уменьшением кривизны гибкой конструкции МС за счёт увеличения растягивающего усилия. Расположение четырёх изолиний, каждая из которых соответствует конкретному смещению

плавающего средства относительно места бурения, говорит о том, что при фиксированном растягивающем усилии стояка большему отклонению S соответствует большая величина $m_{\phi_{HO}}$. Влияние самого отклонения ППБУ от места бурения скважины на величины углов поворота трубопровода в НО является существенным во всём диапазоне рассмотренных натяжений. Из графика следует, что при статической составляющей $S=0,03$ дрейфа надводного плавающего сооружения возможен выход $m_{\phi_{HO}}$ за пределы допустимых значений ($|m_{\phi_{HO}}| \leq 1$) в случае недостаточной величины натяжения ($T < 4,5$) гибкой конструкции.

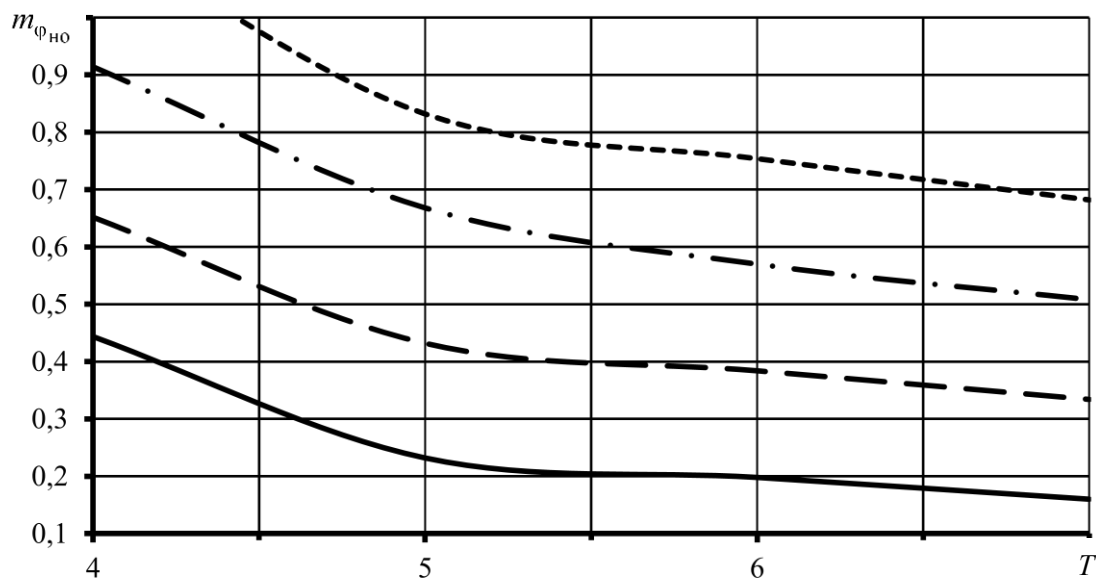


Рис. 2. Зависимость m_{ϕ} в НО от относительного натяжения при $H=150$ м; $h_{3\%}=7$ м и $V_0=1$ м/с:

— $S=0$; — — — $S=0,01$; - · - · - $S=0,02$; ■ ■ ■ $S=0,03$

Картина изменения средних угловых отклонений стояка в ВО (рис. 3) отличается от происходящего с углами поворота в НО (рис. 2). Разница заключается в том, что в диапазоне представленных на графике отклонений ППБУ от места бурения, все средние углы в НО принимают только положительные значения, а соответствующие им углы в ВО располагаются как в отрицательной, так и в положительной областях значений. Исключение составляют только положительные углы поворота стояка в ВО, определяемые изолинией $S=0,03$, и только отрицательные угловые перемещения, характеризующиеся изолинией $S=0$.

Из графика следует, что увеличение натяжения стояка в рассматриваемом диапазоне значений приводит к увеличению средних углов поворота оси его гибкой конструкции в ВО при смещении $S=0,03$. Изолиния $S=0,02$ указывает на переход $m_{\phi_{ВО}}$ из узкой области отрицательных в широкую область положительных значений с последующим их возрастанием по мере увеличения растягивающего усилия. Такой переход вызван уменьшением кривизны упругой линии гибкой конструкции в потоке набегающей жидкости. При $S=0,01$ углы $m_{\phi_{ВО}}$ в основном имеют отрицательные значения и лишь при $T \approx 6,5$ становятся положительными, также как и в случае с изолинией $S=0,02$, благодаря уменьшению кривизны упругой линии несущего корпуса стояка. При удержании плавающего средства над точкой бурения ($S=0$) углы $m_{\phi_{ВО}}$ принимают исключительно отрицательные значения при любых натяжениях трубопровода. Начиная с натяжения $T \approx 5$, при $S=0$ рассматриваемые углы практически перестают изменяться, несмотря на увеличение T .

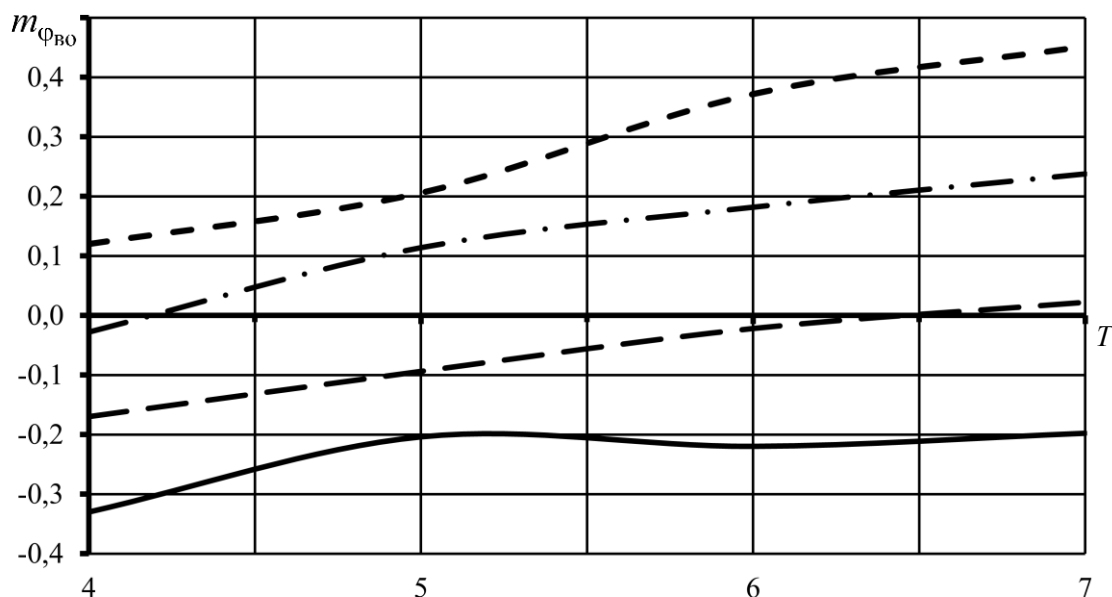


Рис. 3. Зависимость m_{ϕ} в ВО от относительного натяжения при $H=150$ м; $h_{3\%}=7$ м и $V_0=1$ м/с:

— $S=0$; — — — $S=0,01$; — · — · — $S=0,02$; - - - $S=0,03$

Проведённые исследования показали, что значения углов $m_{\phi_{\text{НО}}}$ и $m_{\phi_{\text{ВО}}}$ целиком определяются усилием натяжения МС и статической составляющей дрейфа плавучего средства относительно подводного устья скважины. Высота волны $h_{3\%}$ не оказывает какого-либо существенного влияния на угловые перемещения морского трубопровода в опорах.

В результате проведенных исследований была получена серия графиков, аналогичных показанным на рис. 1-3. Они дают полную информацию об угловых перемещениях МС в НО и ВО в зависимости от натяжения его конструкции и статической составляющей отклонения ППБУ от места бурения скважины. На основании этих графиков могут быть сформулированы практические рекомендации по выбору натяжения длинномерного трубопровода в зависимости от расположения надводного плавучего средства относительно места бурения подводной скважины, интенсивности морского волнения, глубины моря и скорости приливного течения.

Полученные результаты могут представлять интерес для организаций, связанных с проектированием и эксплуатацией комплекса подводного устьевого 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 [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 [Текст]: Методы оценки / 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.