



УДК 624.014:539.343.04

УСТОЙЧИВОСТЬ РАВНОВЕСИЯ СИСТЕМЫ ОПОРНЫХ СТОЕК БЛОКОВ МОРСКИХ ГЛУБОКОВОДНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ОСЕВЫХ СИЛ И СКРУЧИВАЮЩИХ МОМЕНТОВ ОТ ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ВЕТРА И ВОЛН



STABILITY OF EQUILIBRIUM OF THE SUPPORT SYSTEM OF BLOCKS OF DEEP-SEA STATIONARY PLATFORMS UNDER THE JOINT ACTION OF AXIAL FORCES AND TORSIONAL MOMENTS FROM CYCLONIC WIND AND WAVE CIRCULATION

Григулецкий В.Г.доктор технических наук, профессор,
ГУП РК «Черноморнефтегаз»**Фурсов А.Ю.**начальник отдела
календарно-сетевого планирования и контроля бюджета,
ГУП РК «Черноморнефтегаз»
Alexandrpro3@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрена устойчивость опорных блоков морских стационарных платформ с учетом воздействия скручивающего момента от действия циклонической циркуляции ветра и волн.

Ключевые слова: морская стальная стационарная платформа, устойчивость опорных стоек, скручивающий момент, циклоническая циркуляция ветра и волн.

Griguletsky V.G.Doctor of technical sciences, Professor,
State Unitary Enterprise
RK «Chernomorneftegas»**Fursov A.Yu.**Head of the Calendar-Network Planning
and Budget Control Department,
State Unitary Enterprise
RK «Chernomorneftegas»
Alexandrpro3@gmail.com

Annotation. The paper considers the stability of support legs of offshore stationary platforms, taking into account the impact of twisting moment from the action of cyclonic circulation of wind and waves.

Keywords: offshore stationary platform, stability of support legs, twisting moment, cyclonic circulation of wind and waves.

1. Морские стационарные стальные платформы (МСП) являются главными элементами производства нефтегазодобывающих предприятий, работающих на шельфе [1–5].

МСП представляют собой сложные инженерные сооружения, состоящие из опорного блока, закрепленного к морскому дну (грунту) с помощью трубчатых свай, и верхнего строения, используемого для установки буровой установки, технологического оборудования для добычи и дальнейшей транспортировки нефти и газа [6–13].

В частном случае, при малой глубине моря, типовая конструкция морской платформы включает:

- основание высотой 40 м, состоящее из стальных труб с наружным диаметром 1420 мм;
- сваи длиной 75 м (на 35 м забиты в грунт) из стальных труб с наружным диаметром 1220 мм;
- верхнего строения (палубы) высотой 20 м для технологического оборудования.

Общая масса МСП составляет 1200–1300 т [14, 15].

Принято считать, что на опоры действуют силы собственного веса, выталкивающая сила Архимеда, дополнительная сжимающая сила от веса технологического оборудования, веса нарастающих на опоры ракушек и водорослей [2–5, 14, 16]. Силы волнового воздействия учитывались так, как это принято при проектировании МСП в виде статической постоянной нагрузки экстремальной (максимальной) величины ([16], стр. 185). Именно при каких условиях в статье [17] приближенным энергетическим методом Рэлея-Ритца в форме С.П. Тимошенко [18] изучена упругая устойчивость плоской формы равновесия стоек блоков морских стационарных платформ. Для нахождения критической длины (высоты) опорной стойки получены простые приближенные соотношения, учитывающие силы собственного веса свай, выталкивающей силы и вес технологического оборудования. Полученные при таких допущениях результаты [17] нуждаются в дальнейшем развитии и уточнении, поскольку не учтены эффекты скручивания системы опорных стоек платформы от циклонической циркуляции ветра и волн [19].

В сороковых годах прошлого столетия, В.Б. Штокман [19, 20] исследовал циркуляцию морских волн, возбуждаемую постоянным поперечным градиентом скорости прямолинейного ветра в среднем, поперечном ветру сечения замкнутого моря постоянной глубины [19, 20], рисунок 1.

В.Б. Штокман впервые в 1941 г. показал [19, 20], что в замкнутом бассейне в отличие от установившейся циркуляции волн, возбуждаемой равномерным ветром, и осуществляющиеся только в вертикальной плоскости, когда в поверхностном слое вода движется только по ветру, а на некоторой



глубине для компенсации существует течение противоположное направлению ветра (рис. 1, а). Поперечная неравномерность ветра приводит к замкнутой циркуляции не только вертикальной плоскости, но и горизонтальной плоскости. В статьях [19, 20] показано и доказано строго, что в зависимости от перепада скорости прямолинейного ветра в поперечном направлении замкнутая циркуляция горизонтальной плоскости может быть не только в глубинных слоях, но и на поверхности моря, где движение воды направлено против направления ветра (рис. 1, б).

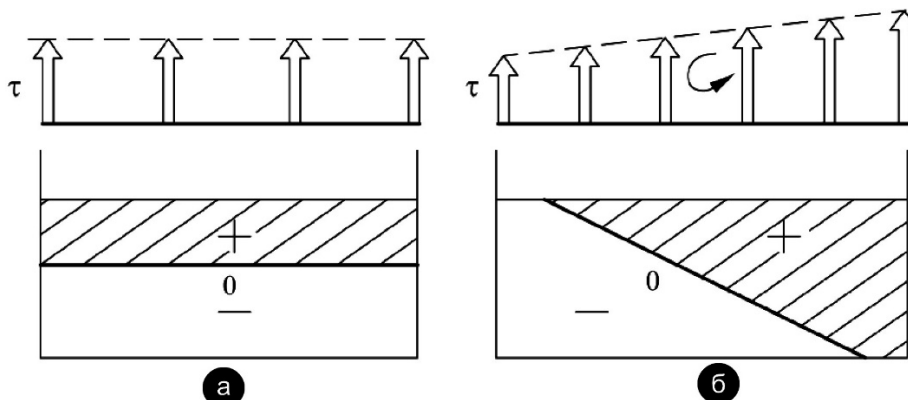
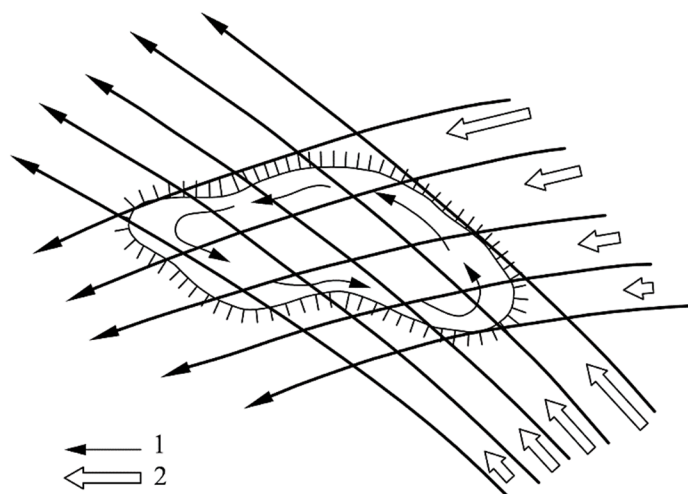


Рисунок 1 – Схемы горизонтальной циркуляции в вертикальном сечении моря, возбуждаемой равномерным (а) и поперечно-неравномерным (б) ветром: вверху – скорость ветра τ ; внизу – направление течений: плюс (+) – по ветру; минус (-) – против ветра

В.Б. Штокман [19–23] установил, что циклоническая циркуляция наблюдается в морях даже при ветрах одного и того же направления над всей поверхностью моря. В частности, например, при восточных ветрах над Азовским морем, или северо-восточных и юго-западных ветрах над Каспийским морем [19]. В.Б. Штокман [19–23] впервые установил, что в ветровых полях северного полушария Земли преобладает циклоническая завихренность (убывание скорости ветра справа налево, если смотреть по ветру) и эта неравномерность ветра приводит к преобладанию циклонической циркуляции (против хода часовой стрелки) во всех внутренних морях и озерах северного полушария так, как показано на рисунке 2.



Рисунке 2 – Схема горизонтальной циркуляции в замкнутом море, возбуждаемой ветрами разных направлений с одной и той же поперечной неравномерностью: 1 – направление ветра; 2 – скорость ветра

Результаты теоретических расчетов подтверждены данными наблюдений [23, 24], особенно в части фактических границ противотечения [19, с. 160–162]. Позже многие результаты В.Б. Штокмана [19–25] подтверждены и обобщены в работах А.И. Фельзенбаума [26–30]. Рассматривая совместное действие ветра, вращения земли и изменение атмосферного давления, В.Б. Штокман и А.И. Фельзенбаум установили, что на любой естественный объект (лед) или инженерное сооружение (платформа) в океане, море или озере действуют следующие факторы: из-за барической силы чистого ветрового воздействия; силы за счет отклонения ветрового нагона за счет конечной высоты сооружения (льда); силы, за счет замкнутости морского бассейна (моря); силы, за счет водообмена между бассейнами (в



данном случае между Азовским и Черным морями); силы, за счет градиентного течения; силы, за счет изменения атмосферного давления. Важно, что указанные силы действуют совместно неравномерно в горизонтальном и поперечном направлениях. Такая неравномерность приводит к циклонической завихренности ветра (убывание скорости ветра справа налево в северном полушарии, если смотреть вдоль ветра). Таким образом, на любое инженерное сооружение в море действуют не только горизонтальные и вертикальные силы волнового воздействия, но и пара сил, создающая скручивающие моменты, обусловленные циклонической циркуляцией ветра и волн, так, как это показано на рисунке 2 (по В.Б. Штокману [19]).

Необходимость учета системы узловых сил, вызывающих общее скручивание платформы на море отмечалось в важной аналитической статье И.Н. Галахова [31], в которой определены общие основные положения расчета прочности полупогружных платформ на волнениях моря. По мнению И.Н. Галахова [31], систему гидростатических, гидродинамических, инерционных, массовых и других распределенных сил, действующих на конструкцию морской платформы можно характеризовать как систему следующих интегральных нагрузок:

Q_0 – система узловых сил, соответствующая положению платформы;

Q_1 – система узловых сил, соответствующая положению платформы вызывающая общий поперечный изгиб;

Q_2 – система узловых сил, вызывающая общий сдвиг поперечных сечений платформы;

Q_3 – система узловых сил, вызывающая общее скручивание конструкции платформы [31].

Для расчета прочности разных элементов полупогружной морской платформы в статье [31] приведены фактические значения уровней обеспеченности указанных узловых сил:

$$C_{q_1} = 0,19; \quad C_{q_2} = 0,06; \quad C_{q_3} = 0,04.$$

При этом узловые силы Q_1 , Q_2 и Q_3 нормированы соответственно на $0,5D$, $0,5D$ и $0,5DL$ (D – водоизмещение всей платформы; L – характерная длина сооружения (например, длина платформы, длина понтонов)).

В частном случае, например, при глубине моря 7,5 м и размерах платформы 20х20 м, можно получить приближенные значения: $Q_1 = 250$ кН (285 т); $Q_2 = 900$ кН (90 т); $Q_3 = 6000$ кН·м.

Сравнивая значения Q_1 , Q_2 и Q_3 можно отметить, что значения узловых сил, вызывающих общее скручивание конструкции платформы имеют значительную величину ($Q_3 = 600$ кН·м = 600 т·м), поэтому их необходимо учитывать в расчетах на устойчивость системы опорных стоек блоков морской стационарной платформы.

2. В последующем изложении принимаем следующие общепринятые положения и допущения теории сопротивления и упругости материалов [32–38].

1. Действующие на опорную стойку внешние силы (сила собственного веса, сосредоточенная осевая сжимающая сила) являются консервативными, т.е. работа приложенных сил определяется только положениями начального и конечного состояний.

2. Физико-механические свойства опорной стойки (вес единицы длины (q), изгибная жесткость (EJ), модуль Юнга материала (E) стойки) определяются опытным путем, или расчетом по известным методикам теории сопротивления материалов [32, 33].

3. Напряженное деформированное состояние стойки при изгибе оси описываются известными уравнениями линейной теории упругости [32–35].

4. Опорная стойка представляет собой вертикальный упругий тяжелый стержень, испытывающий совместное действие сил собственного веса и сосредоточенной силы, равной весу верхнего палубного блока платформы.

5. Опорная стойка (как и вся платформа) испытывает действие консервативного скручивающего момента от действия *циклонической циркуляции* ветра и волн (этот фактор учитывается впервые! в расчетах МСП).

В качестве приближенной расчетной схемы опорной стойки блока морской глубоководной стационарной платформы принимаем вертикальный упругий тяжелый стержень, испытывающий совместное действие распределенной нагрузки (qx) от сил собственного веса, сосредоточенной сжимающей силы (P_k) равной весу оборудования, части веса палубного блока платформы, волновой нагрузки и скручивающего момента (рис. 3).

Нижний конец опоры можно считать жестко заземленным, а верхний конец – свободным (возможны и другие варианты закрепления концов опор). Отметим, что в такой постановке задача об устойчивости прямолинейной формы равновесия для тяжелого вертикального упругого стержня, испытывающего совместное действие сил собственного веса (qx) и сосредоточенной осевой сжимающей нагрузки (P_k), действующей на верхний конец стержня и скручивающего момента (M) не изучена и имеет сложное аналитическое решение в функциях Бесселя [35, 36].

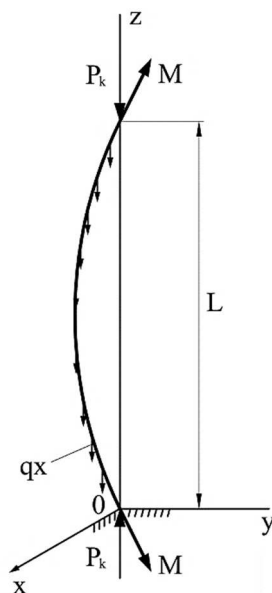


Рисунок 3 – Тяжелый упругий стержень с одним зашечленным концом и другим свободным концом при совместном действии сил собственного веса (qx), осевой сжимающей силы (P_k) и скручивающего момента (M)

В деформированном состоянии изогнутая ось стойки определяется статическими уравнениями равновесия Г. Кирхгофа–А. Клебша [35–40]:

$$\begin{cases} EJ \frac{d^4 x}{dz^4} + M \frac{d^3 y}{dz^3} + P_k \frac{d^2 x}{dz^2} + \frac{d}{dz} \left[q(L-x) \frac{dx}{dz} \right] = 0, \\ EJ \frac{d^4 y}{dz^4} - M \frac{d^3 x}{dz^3} + P_k \frac{d^2 y}{dz^2} + \frac{d}{dz} \left[q(L-x) \frac{dy}{dz} \right] = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где EJ – изгибная жесткость стержня (стойки); M – скручивающий момент; P_k – осевая сосредоточенная сжимающая сила, приложенная к верхнему концу стержня (стойки); L – длина стойки (стержня, вала); q – вес единицы длины стержня.

Вводя комплексный прогиб (r) по формуле:

$$r(x, y) = x + iy, \quad (2)$$

система двух линейных дифференциальных уравнений (1) приводится к одному комплексному уравнению:

$$EJ \frac{d^4 r}{dz^4} - iM \frac{d^3 r}{dz^3} + P_k \frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{d}{dz} \left[q(L-x) \frac{dr}{dz} \right] = 0, \quad (3)$$

где i – мнимая единица ($i^2 = -1$).

Из уравнений (1) в частном случае для невесомого упругого стержня ($q = 0$), можно получить следующие уравнения:

$$\begin{cases} EJ \frac{d^4 x}{dz^4} + M \frac{d^3 y}{dz^3} + P_k \frac{d^2 x}{dz^2} = 0, \\ EJ \frac{d^4 y}{dz^4} - M \frac{d^3 x}{dz^3} + P_k \frac{d^2 y}{dz^2} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

или:

$$EJ \frac{d^4 r}{dz^4} - iM \frac{d^3 r}{dz^3} + P_k \frac{d^2 r}{dz^2} = 0. \quad (5)$$

Систему двух линейных дифференциальных уравнений (4) впервые в 1883 г. получил и исследовал А.Ф. Гринхилл (А. Гринхилл) при изучении упругой устойчивости прямолинейной формы равновесия гребных винтов [41]. Для нахождения критических значений скручивающего момента (M) и осевой



сжимающей сила (P_k) при шарнирном закреплении концов вала, А. Гринхилл в 1883 г. получил [41] следующее соотношение:

$$\left(\frac{M}{2EJ}\right)^2 + \frac{P_k}{EJ} = \frac{\pi^2}{L^2}. \tag{6}$$

Отметим, что формула (6) определяет значения критического крутящего момента (M) и критической осевой сжимающей силы (P_k) *только для невесомого шарнирно закрепленного упругого стержня* (вала, стойки и т.д.).

Система линейных дифференциальных уравнений (4) позже использовалась в работах W. Grammel (1923 г.), А.Е.Н. Лява (1935 г.), С.П. Тимошенко (1955 г.), В.В. Болотина (1961 г.) и др. ученых. В работах С.П. Тимошенко [35], А.С. Вольмира [36], А.Е.Н. Лява [37], В.В. Болотина [43] и др. авторов, для невесомого шарнирно закрепленного упругого стержня нахождение критических значений силы (P_k) и скручивающего момента (M) проводилось по формуле (6). Важную большую аналитическую работу по изучению устойчивости форм равновесия невесомых сжатых и скрученных стержней выполнил в 1967–1976 гг. А.П. Мартыанов [44–48]. В работах [44–48] для описания изогнутой оси невесомого стержня при совместном действии осевых сил и скручивающих моментов используется система линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} EJ \frac{d^2x}{dz^2} + P_k x + M \frac{dy}{dz} = 0, \\ EJ \frac{d^2y}{dz^2} + P_k y - M \frac{dx}{dz} = 0. \end{cases} \tag{7}$$

Общие решения линейных дифференциальных уравнений (7) представляются в виде:

$$\begin{cases} x(z) = -C_1 \sin \alpha z + C_2 \cos \alpha z - C_3 \sin \beta z + C_4 \cos \beta z, \\ y(z) = C_1 \cos \alpha z + C_2 \sin \alpha z + C_3 \cos \beta z + C_4 \sin \beta z, \end{cases} \tag{8}$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – постоянные интегрирования, определяемые по крайевым условиям (условиям заделки концов стержня); α, β – постоянные, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{M}{2EJ} + \sqrt{\frac{M^2 + 4EJP_k}{2EJ}}, \\ \beta &= \frac{M}{2EJ} - \sqrt{\frac{M^2 + 4EJP_k}{2EJ}}. \end{aligned} \tag{9}$$

Важнейшей заслугой А.П. Мартыанова [44–48] является то обстоятельство, что он впервые строго показал, что статический метод исследования устойчивости прямолинейной формы равновесия (метод Л. Эйлера) позволяет получать верные и правильные результаты при рассмотрении пространственных форм равновесия сжато-скрученных упругих стержней (валов, балок). А.П. Мартыанов [44–48] показал, что при исследовании пространственных форм равновесия упругих стержней необходимо использовать строгое определение кривизны пространственной линии:

$$\frac{1}{R^2} = \left(\frac{d^2y}{dz^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2x}{dz^2}\right)^2, \tag{10}$$

а полный прогиб произвольного сечения стержня определять по формуле:

$$\rho(z) = \sqrt{x^2(z) + y^2(z)}. \tag{11}$$

Особенно подробно в работах [44–48] рассматривается случай пространственного изгиба невесомого упругого стержня, нижний конец которого зацмелен, а верхний конец – свободен (консольный стержень), при совместном действии осевой сжимающей силы (P_k) и скручивающего момента (M), рисунок 4.

А.П. Мартыанов [44–48] специально отмечает, что классическая теория устойчивости упругих систем [35–37, 43] в этом случае не дает правильного решения задачи, потому что вместо правильных крайевых условий:

$$\begin{aligned} y(0) &= x(0) = 0, \\ y'(L) &= x'(L) = 0, \end{aligned} \tag{12}$$



в известных работах А. Гринхилла, В. Граммеля, Е.Л. Николаи, В.В. Болотина [43] и др. авторов, использовали краевые условия, не соответствующие геометрии пространственной линии изгиба:

$$\begin{aligned} y(0) = x(0) = 0, \\ y'(L) = x'(L) = 0. \end{aligned} \tag{13}$$

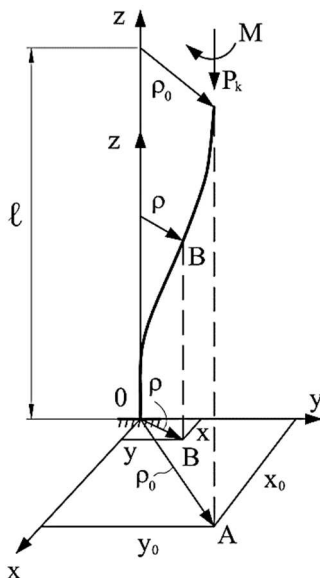


Рисунок 4 – Упругий невесомый стержень с одним заземленным концом (0) и другим свободным концом (А) при совместном действии осевой сжимающей сила (Р_к) и скручивающего момента (М) по А.П. Мартьянову

Для нахождения критических значений скручивающего момента (М) и осевой сжимающей силы (Р_к) при нижнем заземленном конце, а верхнем конце свободным (консольный стержень, рис. 4), А.П. Мартьянов в 1967 г. получил [44] следующее соотношение:

$$\left(\frac{M}{EJ}\right)^2 + \frac{4P_k}{EJ} = \frac{\pi^2}{L^2}. \tag{14}$$

Формула (14) (так же, как и формула (6)) определяет значение критического скручивающего момента (М) и значение критической осевой сжимающей силы (Р_к) только для невесомого упругого консольного стержня (вала, стойки и т. д.); в соотношениях (6) и (14) нет параметра, учитывающего распределение силы собственного веса стержня (вала, стойки). Чтобы учесть влияние сил собственного веса стержня (стойки) на пространственный продольный изгиб, вместо уравнений (4), или (5), необходимо решить соответствующую краевую задачу для системы линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами (1); это решение имеет сложное аналитическое решение и не выражается через элементарные функции [35–37].

Воспользуемся результатами Н. П. Гришковой, которая в 1928 г. опубликовала важную теоретическую работу по исследованию влияния сил собственного веса на продольный изгиб упругих стержней [49]. Рассматривая изгиб упругого тяжелого стержня с нижним зажатым концом, а верхним – свободным, при нахождении критической силы (Р_{кр}) можно использовать приближенную формулу:

$$P_{кр} = P_э - \frac{Q}{3,127}, \tag{15}$$

или приближенно:

$$P_{кр} = P_э - \frac{1}{3}Q, \tag{16}$$

где Q – вес стержня длиной L (Q = qL); q – вес единицы стержня; P_э – критическая сила по Эйлеру для консольного стержня $\left(P_э = \frac{\pi^2 EJ}{4 L^2}\right)$.

Если оба конца тяжелого упругого стержня шарнирно оперты, то при нахождении критической силы (Р_{кр}) можно использовать приближенную формулу:



$$P = P_3 - \frac{1}{2}Q, \tag{17}$$

где P_3 – критическая сила по Эйлеру $\left(P_3 = \pi^2 \frac{EJ}{L^2} \right)$.

В статье [49] при этом специально отмечается, что «Р будет всегда менее P_3 . Если половина собственного веса станет равна P_3 , то критическая сила делается равной нулю, т.е. стержень начнет изгибаться от одного собственного веса. При $0,5Q > P_3$ критическая сила делается отрицательной и, чтоб стержень имел прямоугольную форму, верхний конец его нужно будет подвешивать» [49, с. 151]. Учитывая формулы (15)–(17) можно окончательно записать основные приближенные соотношения:

$$\left(\frac{M}{2EJ} \right)^2 + \frac{1}{EJ} \left(P_k + \frac{1}{2}qL \right) = \frac{\pi^2}{L^2}, \tag{18}$$

$$\left(\frac{M}{EJ} \right)^2 + \frac{4}{EJ} \left(P_k + \frac{1}{3}qL \right) = \frac{\pi^2}{L^2}. \tag{19}$$

Соотношение (18) можно использовать для приближенного нахождения критических значений скручивающего момента (М), осевой сжимающей силы (P_k) и длины опорной стойки (L) при шарнирном закреплении концов. Соотношение (19) можно использовать для приближенного нахождения критических значений скручивающего момента, осевой сжимающей силы и длины стойки при защемлении нижнего конца, и верхнем – свободном конце. Структуры соотношений (18) и (19) показывают, что, в общем случае, для нахождения значения критической длины (высоты) опорной стойки (L), при заданных значениях скручивающего момента (М) и осевой сжимающей силы (P_k) необходимо найти корни кубического уравнения вида:

$$AL^3 + BL^2 - C = 0, \tag{20}$$

где А, В, С – постоянные положительные коэффициенты.

Литература

1. Тимофеев Н.С., Асан-Нури А.О., Рагинский Б.А. К вопросу о морских нефтепромысловых месторождениях // Нефтяное хозяйство. – 1945. – № 1. – С. 46–49.
2. Кулиев И.П. Основные вопросы строительства нефтяных скважин в море. – Баку. : Азербайджанский нефтяной институт, 1958. – 374 с.
3. Агусейнов Ю.А. Глубоководные буровые платформы // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1981. – № 12. – С. 45–48.
4. Дворецкий В.И., Гаджиев Р.А., Мамедов Б.М. К вопросу проектирования морских нефтепромысловых стационарных платформ // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1983. – № 9. – С. 50–52.
5. Никитин Б.А., Мирзоев Д.А., Богатырева Е.В. Морские нефтегазовые промыслы. – М. : РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2005. – 260 с.
6. Опора для морских платформ: А.с. 953082 СССР, МКИ У 02 В 17/00 / Г.А. Ажермачев, А.М. Лехно, В.А. Митрофанов. (СССР). – № 3245797/29–15, Заявлено 30.12.80; Опубл. 23.08.82, Бюл. № 12. – 163 с.
7. Морская ледостойкая платформа предназначенная для бурения эксплуатационных скважин в условиях Северо-Керченского месторождения. – Симферополь : «Спецморнефтегазпроект», 1984. Отчет № 0001681. – 255 с.
8. Морское основание: А.С. 1250615 СССР, МКИ Е 02 В 17/00 / Г.А. Ажермачев, Я.С. Берникер, В.А. Митрофанов (СССР). – № 3828431/29–15; Заявлено 08.10.84; Опубл. 15.08.86, Бюл. № 30. – 92 с.
9. Опора для морских платформ: А.С. 1126664 СССР, МКИ Е 02 В 17/00 / А.М. Лехно, Ю.Е. Булавицнев и др. (СССР). – № 3614172/29–15; Заявлено 27.04.83; Опубл. 30.11.84; Бюл. № 34. – 89 с.
10. Основание под морскую буровую платформу: А.С. 1427035 СССР, МКИ Е 02 В 17/02 / В.П. Синцов, Г.А. Ажермачев, В.А. Митрофанов, Ю.Е. Булавицнев (СССР) – № 4120276 / 29–15; Заявлено 03.07.86; Опубл. 30.09.88, Бюл. № 36. – 114 с.
11. Сборно-разборная платформа под морские буровые: А.С. 1341335 СССР, МКИ Е 02 В 17/00 / В.А. Митрофанов, Г.А. Ажермачев и др. (СССР) – № 3921883/29–15; Заявлено 19.04.85; Опубл. 30.09.87, Бюл. № 36. – 156 с.
12. Опорная конструкция морской платформы: А.С. 1758157 СССР, МКИ Е 02 В 17/02 / В.П. Синцов, В.А. Митрофанов, Г.А. Ажермачев (СССР). – № 4897699 / 15; Заявлено 29.12.90; Опубл. 30.08.92, Бюл. № 32. – 100 с.
13. Синцов В.П. Повышение экологической безопасности при эксплуатации морских стальных стационарных платформ // Строительные конструкции и техногенная безопасность. – Симферополь : Таврия, 1999. – С. 84–93.
14. Симаков Г.А., Шхинек К.Н., Смелов В.А. Морские гидротехнические сооружения на континентальном шельфе. – Л. : Судостроение, 1989. – 328 с.
15. Синцов В., Фурсов А. Типы морских стационарных платформ, используемых ГАО «Черноморнефтегаз» на шельфе Черного и Азовского морей // Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. An International Journal on Operation of Farm and Agri-Food Industry Machinery. – 2012. – Vol. 14. – № 6. – P. 39–44.



16. Доусон Т.Н. Проектирование сооружений морского шельфа. – Л. : Судостроение, 1986. – 288 с.
17. Григулецкий В.Г., Фурсов А.Ю. Устойчивость опорных стоек блоков морских глубоководных стационарных стальных платформ при освоении нефтяных и газовых месторождений на шельфе // Нефтепромысловое дело. – 2020. – № 2 (614). – С. 66–75.
18. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. – М. : Наука, 1971. – 808 с.
19. Штокман В.Б. Избранные труды по физике моря. – Л. : Гидрометеиздат, 1970. – 336 с.
20. Штокман В.Б. Ветровой нагон и горизонтальная циркуляция в замкнутом море небольшой глубины // Известия АН СССР, серия географическая и геофизическая. – 1941. – № 1.
21. Штокман В.Б. Поперечная неравномерность нагонного ветра, как одна из важных причин горизонтальной циркуляции в море // Доклады АН СССР. – 1945. – Т. 49. – № 2.
22. Штокман В.Б. Теория экваториальных противотечений в океанах // Доклады АН СССР. – 1946. – Т. 52. – № 4.
23. Штокман В.Б. Экваториальные противотечения в океане. – Л. : Гидрометеиздат, 1948.
24. Штокман В.Б. Уравнения поля полных потоков, возбуждаемых ветром в неоднородном море // Доклады АН СССР. – 1946. – Т. 54. – № 5.
25. Штокман В.Б. Определение стационарных течений и поля масс, обусловленных ветром в бароклинном море // Труды Института океанологии АН СССР. – 1951. – Т. 5.
26. Фельзенбаум А.И. Связь ветра с уровнем и установившимся течением мелкого моря // Доклады АН СССР. – 1956. – Т. 59. – № 1.
27. Фельзенбаум А.И. Обобщение теории Экмана на случай неравномерного ветра и произвольного рельефа дна замкнутого моря // Доклады АН СССР. – 1956. – Т. 109. – № 2.
28. Фельзенбаум А.И. Теоретические основы расчета дрейфа льдов в Центральном Арктическом бассейне // Доклады АН СССР. – 1957. – Т. 113. – № 2.
29. Фельзенбаум А.И., Фомин Л.М., Штокман В.Б. Методы расчета глубинных морских течений по поверхностному течению и градиенту атмосферного давления // Труды Института океанологии АН СССР. – 1957. – Т. 2.
30. Фельзенбаум А.И. Теория установившегося дрейфа льдов и расчет среднего многолетнего дрейфа в Центральной части арктического бассейна // Проблемы Севера. – 1958. – Вып. 2.
31. Галахов И.Н. Основные положения расчета прочности полупогружных платформ на волнении // Судостроение. – 1976. – № 8. – С. 12–14.
32. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М. : Наука, 1976. – 807 с.
33. Ильюшин А.А., Ленский В.С. Сопротивление материалов. – М. : Физматгиз, 1959. – 371 с.
34. Федосьев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. – М. : Наука, 1967.
35. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. – М. : Гостехтеориздат, 1955. – 509 с.
36. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. – М. : Наука, 1967.
37. Ляв А.Е.Н. Математическая теория упругости. – М.-Л. : ГосНаучТехиздат, 1935. – 674 с.
38. Григулецкий В.Г. Устойчивость тяжелого упругого стержня, вращающегося в вязкой среде при совместном действии неоднородных скручивающих моментов и осевых сил // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1987. – № 1. – С. 172–177.
39. Gustav Kirchhoff, Vorlesungen über mathematische Physik, Mechanik, B.G. Teubner. – Leipzig, 1897.
40. Alfred Clebsch, Theorie der Elasticität Fester Körper, B.G. Teubner. – Leipzig, 1862. – P. 190–260.
41. Greenhill A.F. On the Strength of Shafting When Exposed Both to Torsion and End Thrust // Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers. – London, England, 1883. – Vol. 6. – P. 182–209.
42. Grammel W. Das Kritische Drillungsmoment von Wellen // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik. – 1923. – Vol. 3. – P. 262–266.
43. Болотин В.В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. – Физматгиз, 1961. – 340 с.
44. Мартыанов А.П. Некоторые вопросы упругой пространственной потери устойчивости стержней : Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М. : МИСИ, 1967. – 7 с.
45. Мартыанов А.П. Об исследовании устойчивости сжатых и скрученных стержней // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1968. – № 1. – С. 43–47.
46. Мартыанов А.П. О прочности и устойчивости с формой упругой линии двойкой кривизны // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1970. – № 2.
47. Мартыанов А.П. О равновесных формах при пространственной потере устойчивости стержней // Прикладная механика. – 1971. – Т. 7. – Вып. 1.
48. Мартыанов А.П. Неконсервативные задачи и методы расчета стержней, стержневых систем и оболочек. – Казань : Таткнигоиздат, 1976. – 334 с.
49. Гришкова Н.П. Влияние собственного веса на продольный изгиб стержней // Вестник Инженеров. – 1928. – № 3. – С. 149–152.

References

1. Timofeev N.S., Asan-Nuri A.O., Raginskiy B.A. To the question about the offshore oilfields // Oil economy. – 1945. – № 1. – P. 46–49.
2. Kuliev I.P. Main Issues of Oil Well Construction at Sea. – Baku. : Azneftnescher, 1958. – 374 p.
3. Agusainov Y.A. Deep-water drilling platforms // Azerbaijan Oil Industry. – 1981. – № 12. – P. 45–48.
4. Dvoretzky V.I., Hajiyev R.A., Mammadov B.M. To the question of designing of offshore oilfield stationary platforms // Azerbaijan Oil Industry. – 1983. – № 9. – P. 50–52.
5. Nikitin B.A., Mirzoev D.A., Bogatyreva E.V. Offshore oil and gas fields. – M. : Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2005. – 260 p.
6. Support for the offshore platforms: A.S. 953082 USSR, MKI U 02 V 17/00 / G.A. Azhermachev, A.M. Lekhno, V.A. Mitrofanov. (U.S.S.R.). № 3245797/29-15, Declared 30.12.80; Obl. 23.08.82, Bulletin № 12. – 163 p.



7. Offshore ice-resistant platform designed for drilling of production wells in conditions of Severo-Kerchenkoye field. Simferopol : «Spetsmorneftegazproekt», 1984. Report № 0001681. – 255 p.
8. Marine Base: A.S. 1250615 USSR, MKI E 02 V 17/00 / G.A. Azhermachev, Ya.S. Berniker, V.A. Mitrofanov (USSR). № 3828431/29-15; Declared 08.10.84; Oblast 15.08.86, Bulletin № 30. – 92 p.
9. Support for offshore platforms: A.S. Mitrofanov (USSR). 1126664 USSR, MKI E 02B 17/00 / A.M. Lekhno, Yu.E. Bulavintsev et al. (USSR) № 3614172/29-15; declared 27.04.83; Obl. 30.11.84; Bulletin № 34. – 89 p.
10. The basis for offshore drilling platform: A.S. 1427035 USSR, MKI E 02 V 17/02 / V.P. Sintsov, G.A. Azhermachev, V.A. Mitrofanov, Yu.E. Bulavintsev (USSR) № 4120276 / 29-15; Declared 03.07.86; Obl. 30.09.88, Bulletin № 36. – 114 p.
11. Assembled and dismantled platform for the sea drilling: A.S. 1341335 USSR, MKI E 02 V 17/00 / V.A. Mitrofanov, G.A. Azhermachev et al. (USSR) № 3921883/29-15; declared 19.04.85; Obl. 30.09.87, Bulletin № 36. – 156 p.
12. Supporting structure of the sea platform: A.S. Azhermachev et al. 1758157 USSR, MKI E 02 V 17/02 / V.P. Sintsov, V.A. Mitrofanov, G.A. Azhermachev (USSR) № 4897699 / 15; Declared 29.12.90; obl. 30.08.92, Bulletin № 32. – 100 p.
13. Sintsov V.P. Ecological safety increase at operation of the marine steel stationary platforms // Construction structures and technogenic safety. – Simferopol : Tavria, 1999. – P. 84–93.
14. Simakov G.A., Shkhinek K.N., Smelov V.A. Marine hydraulic structures on the continental shelf. – L. : Shipbuilding, 1989. – 328 p.
15. Sintsov V., Fursov A. Types of Offshore Fixed Platforms Used by GAO «Chernomorneftegaz» on Shelf of Black and Azov Seas // Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. An International Journal on Operation of Farm and Agri-Food Industry Machinery. – 2012. – Vol. 14. – № 6. – P. 39–44.
16. Dawson T.N. Design of the sea shelf structures. – L. : Shipbuilding, 1986. – 288 p.
17. Griguletsky V.G., Fursov A.Yu. Stability of Support Stands of Blocks of Offshore Deep-Water Fixed Steel Platforms during Development of Oil and Gas Fields on the Shelf // Oilfield Engineering. – 2020. – № 2 (614). – P. 66–75.
18. Timoshenko S.P. Rods, plates and shells stability. – M. : Science, 1971. – 808 p.
19. Shtokman V.B. Selected works in physics of the sea. – L. : Hydrometeoizdat, 1970. – 336 p.
20. Shtokman V.B. Wind surge and horizontal circulation in the closed sea of small depths // Izvestia AS USSR, series geographical and geophysical. – 1941. – № 1.
21. Shtokman V.B. Transverse non-uniformity of the surge wind as one of the important reasons of the horizontal circulation in the sea // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1945. – Vol. 49. – № 2.
22. Shtokman V.B. Theory of the equatorial counterflow in oceans // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1946. – V. 52. – № 4.
23. Shtokman, V.B. Equatorial counter-currents in the ocean. – L. : Hydrometeoizdat, 1948.
24. Shtokman V.B. Equations of the field of the full flows excited by the wind in the heterogeneous sea // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1946. – Vol. 54. – № 5.
25. Shtokman V.B. Definition of the stationary currents and the field of the masses caused by the wind in the baroque sea // Proc. of Institute of Oceanology of USSR Academy of Sciences. – 1951. – Vol. 5.
26. Felsenbaum A.I. Wind connection with the level and the established shallow sea current // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1956. – Vol. 59. – № 1.
27. Felsenbaum A.I. Generalization of Ekman theory in case of the uneven wind and the arbitrary relief of the closed sea bottom // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1956. – Vol. 109. – № 2.
28. Felsenbaum A.I. Theoretical bases of ice drift calculation in the Central Arctic basin // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1957. – Vol. 113. – № 2.
29. Felsenbaum A.I., Fomin L.M., Shtokman V.B. Calculation methods of the deep sea currents along the surface current and the atmospheric pressure gradient // Proc. of Institute of Oceanology, USSR Academy of Sciences. – 1957. – Vol. 2.
30. Felsenbaum A.I. Theory of the steady ice drift and calculation of the average long-term drift in the Central part of the Arctic basin // Problems of the North. – 1958. – Issue. 2.
31. Galakhov I.N. Basic positions of the semi-submersible platforms strength calculation on wave // Shipbuilding. – 1976. – № 8. – P. 12–14.
32. Belyaev N.M. Resistance of Materials. – M. : Nauka, 1976. – 807 p.
33. Ilyushin A.A., Lenskiy V.S. Materials resistance. – M. : Fizmatgiz, 1959. – 371 p.
34. Feodosev V.I. Selected problems and questions on resistance of materials. – M. : Nauka, 1967.
35. Timoshenko S.P. Stability of elastic systems. – M. : Gostekhizdat, 1955. – 509 p.
36. Volmir A.S. Stability of the deformable systems. – M. : Science, 1967.
37. Ljav A.E.N. Mathematical theory of elasticity. – M.-L. : GosNauchTekhizdat, 1935. – 674 p.
38. Griguletsky V.G. Stability of the heavy elastic rod rotating in the viscous medium under the joint action of the heterogeneous twisting moments and the axial forces // Izvestia AS USSR. Mechanics of a solid body. – 1987. – № 1. – P. 172–177.
39. Gustav Kirchhoff, Vorlesungen über mathematische Physik, Mechanik, B.G. Teubner. – Leipzig, 1897.
40. Alfred Clebsch, Theorieder Elasticität Fester Körper, B.G. Teubner. – Leipzig, 1862. – P. 190–260.
41. Greenhill A.F. On the Strength of Shafting When Exposed Both to Torsion and End Thrust // Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers. – London, England, 1883. – Vol. 6. – P. 182–209.
42. Grammel W. Das Kritische Drillungsmoment von Wellen // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik. – 1923. – Vol. 3. – P. 262–266.
43. Bolotin V.V. Non-conservative problems of the theory of elastic stability. – Fizmatgiz, 1961. – 340 p.
44. Martyanov A.P. Some questions of elastic spatial loss of stability of rods : Abstract of thesis of Cand. – M. : MISSY, 1967. – 7 p.



45. Martyanov A.P. About research of stability of compressed and twisted rods // *Izvestia Vuzov. Construction and architecture.* – 1968. – № 1. – P. 43–47.
46. Martyanov A.P. About strength and stability with form of elastic line of double curvature // *Izvestia Vuzov. Construction and architecture.* – 1970. – № 2.
47. Martyanov A.P. About equilibrium forms at spatial loss of stability of rods // *Applied mechanics.* – 1971. – Vol. 7. – Part 1.
48. Martyanov A.P. *Non-Conservative Problems and Methods of Calculation of Rods, Rod Systems and Shells.* – Kazan : Tatknigoizdat, 1976. – 334 p.
49. Grishkova N.P. Influence of eigenfact weight on longitudinal bending of rods // *Vestnik Izhenerov.* – 1928. – № 3. – P. 149–152.