



УДК 622.242.424

**МЕТОДИКА РАСЧЁТА УСТОЙЧИВОСТИ ОПОРНЫХ СТОЕК  
БЛОКОВ МОРСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ  
ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ОСЕВЫХ СИЛ  
И СКРУЧИВАЮЩИХ МОМЕНТОВ  
ОТ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ВЕТРА И ВОЛН**

**METHODOLOGY FOR CALCULATING THE STABILITY  
OF THE SUPPORT LEGS OF FIXED OFFSHORE PLATFORM  
BLOCKS UNDER THE COMBINED ACTION OF AXIAL FORCES  
AND TORSION MOMENTS FROM THE CYCLIC CIRCULATION  
OF WIND AND WAVES**

**Су-И-Нао**

Инженерная академия

**Фурсов Александр Юрьевич**

ГУП РК «Черноморнефтегаз»

**Григулецкий Владимир Георгиевич**

доктор технических наук, профессор,  
Российский государственный университет нефти и газа  
(национальный исследовательский университет)  
имени И.М. Губкина  
gvg-tnc@mail.ru

**Аннотация.** В статье кратко описаны основные аварии морских стационарных платформ, обусловленные изгибом опорных стоек блоков, как следствие потери устойчивости прямолинейной формы равновесия оси стоек. Указаны аварии морских платформ, происшедшие в Каспийском море (1962 г.), Северном море (1965 г., 1980 г.), у берегов Канады (1982 г.), в Южно-Китайском море (1983 г.), у берегов Бразилии (2001 г.) и др. Предполагается, что одной из главных причин разрушения конструкций морских платформ (448 аварий за период 1973–1981 гг.) и опрокидывания (160 аварий) является изгиб опорных стоек блоков от совместного воздействия штормовых волн, сил собственного веса стоек, сжимающей сосредоточенной нагрузки от веса технологического оборудования и веса верхней палубы и скручивающего момента от циклонической циркуляции ветра и волн. Впервые приведённые расчёты критической длины (высоты) опорной стойки МСП при совместном действии осевых сжимающих сил и скручивающего момента показывают, что значения скручивающего момента необходимо учитывать при расчётах и проектировании параметров опорных стоек блоков МСП.

**Ключевые слова:** авария; платформа морская; осевые силы; скручивающий момент; критическая длина стойки; циклоническая циркуляция ветра и волн.

**Введение**

**И**брагимов А.М. в 1962 году одним из первых выполнил анализ причин разрушения морских нефтепромысловых сооружений в Каспийском море за 1957–1959 гг. и установил, что основными причинами повреждений и разрушений морских эстакад являются не только штормовые волны (т.е. воздействие на сооружение волн большой интенсивности, чем это было принято проектом), но и

**Su-I-Nao**

Engineering Academy

**Fursov Alexander Yurievich**State Unitary Enterprise of the Republic of  
Crimea «Chernomorneftegaz»**Griguletsky Vladimir Georgievich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
National University of Oil and Gas  
«Gubkin University»  
gvg-tnc@mail.ru

**Annotation.** The article briefly describes the main accidents of offshore stationary platforms caused by the bending of the support legs of the blocks, as a result of the loss of stability of the rectilinear balance of the axis of the legs. Indicated are the accidents of offshore platforms that occurred in the Caspian Sea (1962), the North Sea (1965, 1980), off the coast of Canada (1982), in the South China Sea (1983), off the coast of Brazil (2001) and others. It is assumed that one of the main reasons for the destruction of structures of offshore platforms (448 accidents for the period 1973–1981) and overturning (160 accidents) is the bending of the support legs of the blocks from the combined effect of storm waves, gravity forces racks, compressing the concentrated load from the weight of the processing equipment and the weight of the upper deck and the torsion moment from the cyclonic circulation of wind and waves. For the first time, the calculations of the critical length (height) of the fixed offshore platform support post under the combined action of axial compressive forces and a twisting moment show that the values of the twisting moment must be taken into account when calculating and designing the parameters of the support legs of the fixed offshore platform blocks.

**Keywords:** offshore platform; axial forces; twisting moment; critical length of the rack; cyclonic circulation of wind and waves.



**пренебрежение направлением подхода и формы волнения**, а также несоответствие типов конструкций естественным условиям и др.» [1, с. 30].

В статье [1] особенно подробно отмечается случай повреждения крупноблочного морского основания № 290.

Основание № 290 запроектировано для бурения от одной до трёх (последовательно в трёх точках) двухствольных скважин в море. Нагрузка в крюке составляет 120 тонн при одновременном нахождении за «пальцами» свечей бурильных труб весом 45 тонн. Основание состоит из пяти (шести) опорных блоков, причём четыре из них были установлены под рабочую площадку основания и один – под жилую. Кроме того, основание имеет две посадочные площадки и два пешеходных мостика.

Вертикальные нагрузки на отдельные ноги основания слагаются из веса оборудования, веса различных материалов и собственного веса конструкций, а также из дополнительных нагрузок, возникающих при действии на сооружения совокупности горизонтальных усилий (ветер, волнение и течение).

В результате анализа последствий шторма было установлено, что почти все блоки, предназначенные для бытовых помещений, опрокинуты или сильно деформированы, сломан верхний пояс верхнего строения производственных блоков, а также имели место срыв надводных и подводных подкосов, связей и другие разрушения. Всё это говорит о том, что в отношении устойчивости блоки культбудки значительно уступают центральному и производственному блокам. Процесс повреждения оснований по время шторма происходит примерно так: **серии огромных волн обрушивались на основание, вследствие этого промежуточные секции, а также надводные связи, создающие жёсткость между блоками, вышли из строя, блоки деформировались (зашаталась), а местами раскололись примерно так, как у основания № 410.** Буровики, находившиеся на расстоянии 500–600 м от этого основания, заметили, что секции между центральным и производственным блоками в момент взаимодействия с волной резко наклонились к морю, а затем скрылись под водой. После этого центральный блок с вышкой стал сильно колебаться и так же, как промежуточные секции, опрокинулся в море.

Характер аварий этих сооружений исследовать в достаточной степени не удалось из-за большой глубины и суровых гидрометеорологических условий; захламлённость участка частями металлоконструкций, буровым оборудованием, вышками не позволила использовать водолазов. По грубо приближённым отрывочным сведениям, полученным от водолазов, установлен следующий характер деформаций и разрушений: в отличие от эстакадных площадок здесь около 70 % опорных блоков выдернуто вместе с забитыми сваями (анкерами), а остальные согнулись и сломались в пределах точки заземления. Анализ последствий шторма позволил выяснить, насколько нерационально были выбраны отдельные узлы конструкций. Обобщение изложенного выше анализа, а также анализ результатов последующих исследований в этой области дают нам возможность, **с целью увеличения жёсткости оснований и устойчивости блоков рекомендовать следующие конструктивные мероприятия:**

– во-первых, установку дополнительных связей жесткости между блоками производственной площадки оснований;

– во-вторых, увеличение горизонтальных размеров конструкции блоков в нижней их части.

Оптимальными для этих целей могут служить блоки пирамидальной конструкции. Имеющихся фактических материалов недостаточно для полного уяснения физических сторон явления в целом, но уже сейчас можно отметить, что одной из причин разрушения одних и сохранения других оснований, находившихся в одних и тех же условиях, по всей вероятности, являются производственные факторы. Сравнительный анализ произведён нами для видов оснований. Здесь мы ограничиваемся лишь описанным выше, так как конструктивные и гидрометеорологические условия, а также картина повреждений и разрушений их почти одинаковы» [1].

В качестве основных видов А.М. Ибрагимов отмечает следующие положения [1].

1. Основной причиной повреждения и разрушения морских нефтепромысловых гидротехнических сооружений в период жестоких штормов в районе строительства является то, что в основу расчёта сооружений были положены в качестве исходных данные краткосрочных гидрометеорологических наблюдений.

**Зафиксированные элементы волн оказались большими, чем принятые проектом.** Отклонение действительных значений элементов волн от принятых создало условия для разрушения и повреждения. Поэтому исходные гидрометеорологические данные для проектирования гидротехнических сооружений необходимо определять на базе долгосрочных наблюдений.

2. **Для повышения устойчивости морских нефтепромысловых гидротехнических сооружений необходимо добиваться увеличения размеров оснований в плане применением наклонных опор, укрупнённых блоков, строительства сооружений, связанных в одну общую жёсткую систему, и созданием оснований, исключающих возможность одновременного действия на них более одной волны** [1].

Таким образом, анализ причин разрушения морских нефтепромысловых сооружений в Каспийском море [1] в 1962 году показал необходимость повышения устойчивости морских гидротехнических сооружений и, следовательно, исследования этой проблемы.



18 декабря 2013 года газета «Vesti.ru» описала первую катастрофу в истории освоения крупнейших нефтегазовых месторождений Северного моря. Первая катастрофа в Северном море произошла **27 декабря 1965 года**. СПБУ «Sea Gem» представляла собой старую баржу, поставленную на 10 металлических опор, и именно опоры ее подвели. Для перемещения с места на место барже необходимо было опуститься на поверхность воды, то есть «поднять ноги». В процессе этой операции две из десяти опор согнулись и сломались. Баржа перевернулась, и всё, что было на ней незакрепленного, включая экипаж, посыпалось в холодные воды Северного моря. В результате погибли 13 членов экипажа. Причина аварии – усталость металла.

Из краткого описания аварии следует, что главной причиной аварии этой катастрофы является **изгиб двух «опорных стоек» из-за потери устойчивости прямолинейной формы равновесия.**

В.Ф. Сидорченко [2] в 2006 году опубликовал большую монографию, в которой описаны многие важные юридические аспекты разных катастроф на море (корабли, самолеты, паромы и т.д.). В книге [2] отмечаются кратко некоторые крупные аварии с морскими платформами. В частности, описываются следующие аварии. **В марте 1980 года** в Северном море разломилась и опрокинулась норвежская буровая платформа «Alexander Keilland». Из 212 человек, находившихся на платформе, погибло 123 человека. Причина катастрофы – усталость металла (рис. 1).

20 марта 2001 года (news.ru.com) у берегов Бразилии произошла совершенно аналогичная авария и разрушение крупнейшей полупогружной платформы P-32. Платформа весом 33 тыс. тонн и высотой 130 м затонула в море на глубине 1600 м. Морская платформа принадлежала компании «Petrobras» затонула после трёх взрывов на ней (рис. 2).

**В сентябре 1982 года** недалеко от берегов Канады перевернулась и затонула американская нефтяная буровая платформа «Ocean Ranger». Причина катастрофы – небывалый ураган. Ударами 15-метровых волн были разбиты окна и затоплены жилые помещения. Сверхнадежная полупогруженная в океан железобетонная конструкция весом десятки тысяч тонн, считавшаяся абсолютно непотопляемой, получила опасный крен и затонула. На платформе находилось 84 человека, все погибли.



**Рисунок 1** – Авария буровой платформы «Alexander Keilland» в Северном море (Норвегия, март 1980 года, погибло 123 человека)



**Рисунок 2** – Крушение полупогружной платформы P-36 в 2001 году у побережья Бразилии на глубине 130 м (www.neftianka.ru)

25 октября 1983 года в Южно-Китайском море в 60 милях южнее острова Хайнань во время тайфуна «Лекс» бесследно исчезла вместе с экипажем (81 человек) буровая платформа «Гломар Ява Си». Экипаж платформы подал сигнал бедствия, а затем связь с ним прервалась. В момент катастрофы ветер



достигал скорости 140 км/ч, а высота волн была 8–14 м. Предполагается, что под воздействием тайфуна платформа получила ряд повреждений, потеряла устойчивость, опрокинулась и затонула. Погибли 81 чел.

В книге [2] приведены, кроме того, результаты статистического анализа крупных аварий на морских платформах при бурении и добыче нефти и газа в разных районах мира, выполненные японскими учёными в 1986 году [3]. При этом отмечается следующее [2, 3]. За 9 лет (1973–1981 гг.) во всём мире с морскими платформами произошло 1417 аварий, в том числе: столкновения при транспортировке – 223 аварии; разгерметизация средств плавучести – 73 аварии; опрокидывание – 160 аварии; разрушение конструкции платформ – 448 аварии; потери управления – 87 аварии и т.д. [2, с. 30]. Из краткого описания аварий [2, 3] можно предположить, что одной из главных причин разрушения конструкций морских платформ (448 аварий) и опрокидывания (160 аварий) является изгиб опор от совместного воздействия штормовых волн, сил собственного веса опорных стоек, сжимающей сосредоточенной нагрузки от веса технологического оборудования и веса верхней палубы, а также действия скручивающего момента вследствие циклонической циркуляции и течения воды в море. Таким образом, можно предположить, что из общего числа аварий с морскими платформами за 9 лет (1973–1981 гг.) – 1417 аварий, 608 аварий (448 + 160 = 608), т.е. 42,9 % произошли из-за деформации опорных стоек, прежде всего, и, следовательно, из-за потери устойчивости прямолинейной формы равновесия, что может свидетельствовать об актуальности исследования и важности изучения этой проблемы для техники и технологии освоения морских месторождений углеводородов (нефть, газ).

В.И. Богоявленский [4], характеризуя чрезвычайные ситуации при освоении ресурсов углеводородов на акваториях, отмечает, в частности, следующее. Начиная с 2005 года, история нефтегазодобычи в Мексиканском заливе полна драматических событий. В 2005–2008 гг. здесь свирепствовала серия мощных ураганов, повредив инфраструктуру многих морских нефтегазовых промыслов и нанеших значительный урон нефтегазовой индустрии США. В августе 2005 года ураган «Katrina» разрушил 44 и повредил 20 буровых и добывающих платформ, а в сентябре 2005 года ураган «Rita» разрушил 62 буровых и 32 добычных платформы.

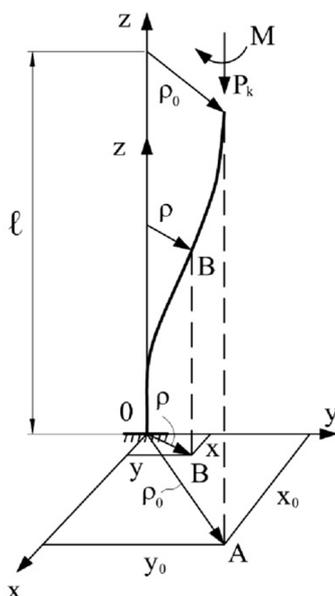
Они же повредили 100 и 83 трубопровода. Из-за разрушений «Katrina» в воду вылилось около 26 тыс. тонн (190 тыс. баррелей) нефти и нефтепродуктов. В статье [4], в частности, кратко описан случай, когда современная морская самопогружная плавучая платформа для бурения установка (СПБУ) во время сильного шторма явно потеряла устойчивость, разрушила одну опору и затонула у берегов Анголы. 2 июня 2013 года у берегов Анголы в районе устья реки Конго, не успев приступить к бурению, затонула новейшая (2009 года постройки) СПБУ «Petro Negro-6» компании «Saipen SpA», способная бурить скважины до глубины 3100 м. Катастрофа произошла из-за слома одной из трёх опор во время сильного волнения. При этом один человек погиб, а пятеро получили травмы [4].

Можно предположить, что разрушение одной опоры СПБУ от сильного шторма у берегов Анголы также произошло в результате потери устойчивости прямолинейной формы равновесия одной опоры платформы. Вопросы освоения углеводородов арктического шельфа России [5–7], безопасность мореплавания [8] и особенно обеспечения экологических требований континентального шельфа [9] требуют повышения устойчивости морских стационарных платформ.

### **О методике расчёта устойчивости прямолинейной формы равновесия опорных стоек блоков морских стационарных платформ**

В работе [10] проведено исследование устойчивости плоской формы равновесия опорных стоек блоков морских глубоководных стационарных платформ энергетическим методом Рэлея-Ритца в форме С.П. Тимошенко. Для нахождения критической длины (высоты) опорной стойки получены простые приближённые соотношения, учитывающие волновую статическую нагрузку, выталкивающую силу Архимеда, вес специального технологического оборудования и собственный вес свай.

В статье [11] впервые проведено исследование устойчивости пространственной формы равновесия опорных стоек блоков морских глубоководных стационарных платформ при совместном действии осевых сил и скручивающих моментов от циклонической циркуляции ветра и волн. В качестве расчётной схемы анализа при этом принималось, что действующие на опору внешние силы являются консервативными, опорная стойка представляет собой вертикальный упругий тяжёлый стержень, испытывающий совместное действие сил собственного веса, сосредоточенной сжимающей силы, равной весу технологического оборудования и верхнего палубного блока платформы и консервативного скручивающего момента от действия циклонической циркуляции ветра и волн. Напряжённое деформирование состояние стойки при изгибе оси описывается известными дифференциальными уравнениями линейной теории упругости [12]. Нижний конец опоры жёстко закреплён, а верхний – свободный, т.е. имеем консольный тяжёлый упругий стержень, испытывающий совместное действие осевых сил и скручивающего момента (рис. 3).



**Рисунок 3** – Расчётная схема пространственного изгиба оси опорной стойки МСП при совместном действии осевых сжимающих сил и скручивающего момента

Применительно к условиям работы опорных стоек блоков морских стационарных платформ, запишем статические уравнения равновесия изгиба оси стойки в виде:

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

где  $EJ$  – изгибная жёсткость 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 с переменными коэффициентами (1) приводится к одному комплексному уравнению:

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

$i$  – мнимая единица ( $i^2 = -1$ ).

Систему двух линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами (1) можно записать в виде:

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

где  $P = P_k + qL$ . (5)

Комплексное линейное дифференциальное уравнение с переменными коэффициентами (3) при этом можно записать в виде:

$$EJ \frac{d^4 r}{dz^4} - iM \frac{d^3 r}{dz^3} + P \frac{d^2 r}{dz^2} - q \frac{d}{dz} \left( z \frac{dr}{dz} \right) = 0. \quad (6)$$



Для решений уравнений (4) (или (1)) принимаем следующие краевые условия:

$$\begin{aligned} y(0) = 0, \quad x(0) = 0, \\ y'(L) = 0, \quad x(L) = 0. \end{aligned} \tag{7}$$

Эти соотношения впервые установлены в работах А.П. Мартыанова и соответствуют геометрии пространственной линии изгиба при совместном действии скручивающего момента (M) и осевой сжимающей силы (P), приложенной к верхнему свободному концу упругого стержня, а нижний конец стержня – закреплён (рис. 3).

А.П. Мартыанов [14–16] специально отмечает, что классическая теория устойчивости упругих систем в этом случае не даёт правильного решения задачи, потому, что **вместо правильных краевых условий (7) в известных работах Е.Л. Николаи [17], В.В. Болотина [19] и др. авторов, использовались краевые условия, не соответствующие геометрии пространственной линии изгиба:**

$$\begin{aligned} y(0) = x(0) = 0, \\ y'(L) = x'(L) = 0. \end{aligned} \tag{8}$$

В работах А.П. Мартыанова [14–16] для описания изогнутой оси невесомого стержня при совместном действии осевых сил и скручивающих моментов использовалась система линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} EJ \frac{d^2x}{dz^2} + Px + M \frac{dy}{dz} = 0, \\ EJ \frac{d^2y}{dz^2} + Py - M \frac{dx}{dz} = 0, \end{cases} \tag{9}$$

Эту систему дифференциальных линейных уравнений можно записать в виде одного линейного комплексного дифференциального уравнения:

$$EJ \frac{d^4r}{dz^4} - iM \frac{d^3r}{dz^3} + P \frac{d^2r}{dz^2} = 0, \tag{10}$$

где

$$r(x, y) = x + iy.$$

Для нахождения критических значений скручивающего момента (M) и осевой сжимающей силы (P) при нижнем закреплённом конце, а верхнем конце свободным (консольный стержень) (рис. 3) А.П. Мартыанов в 1967 году получил следующее соотношение:

$$\left( \frac{M}{EJ} \right)^2 + \frac{4P}{EJ} = \frac{\pi^2}{L^2}. \tag{11}$$

Формула (11) определяет значение критического скручивающего момента (M) и значение критической осевой сжимающей силы (P<sub>к</sub>) только для невесомого упругого консольного стержня (вала, стойки и т.д.); в соотношении (11) нет параметра, учитывающего распределённые силы собственного веса стержня (вала, стойки). Чтобы учесть влияние сил собственного веса стержня (стойки) на пространственный продольный изгиб, вместо уравнений (9) необходимо решить соответствующую краевую задачу для системы линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами (11); это решение имеет сложное аналитическое решение и не выражается через элементарные функции [20].

Чтобы учесть влияние сил собственного веса стойки на изгиб оси, воспользуемся известными и фундаментальными результатами Н.П. Гришковой [1], которая в 1928 году опубликовала важную теоретическую работу по исследованию влияния сил собственного веса на продольный изгиб упругих стержней. Рассматривая изгиб упругого тяжелого стержня с нижним зажатым концом, а верхним – свободным, Н.П. Гришкова установила, что при нахождении значения критической силы (P<sub>к</sub>) для тяжелого упругого стержня можно использовать приближённую формулу:

$$P_{кр} = P_э - \frac{Q}{3,127}, \tag{12}$$

или приближённо:

$$P_{кр} = P_э - \frac{1}{3}Q, \tag{13}$$

где Q – вес стержня длиной L (Q = qL); q – вес единицы стержня; P<sub>э</sub> – критическая сила по Эйлеру для консольного стержня:

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



Учитывая результаты Н.П. Гришковой [21] и формулу (13), основное соотношение (11) можно записать в виде:

$$\left(\frac{M}{EJ}\right)^2 + \frac{4}{EJ}\left(P + \frac{1}{3}qL\right) = \frac{\pi^2}{L^2}. \tag{15}$$

Соотношение (15) можно использовать для приближённого нахождения критических значений скручивающего момента, осевой сжимающей силы и длины стойки при защемлении нижнего конца, и верхнем – свободном конце. Структура соотношения (15) показывает, что в общем случае для нахождения значения критической длины (высоты) опорной стойки (L) при заданных значениях скручивающего момента (M) и осевой сжимающей силы (P<sub>к</sub>) необходимо найти корни кубического уравнения вида:

$$AL^3 + BL^2 - C = 0, \tag{16}$$

где A, B и C – постоянные положительные коэффициенты.

Отметим, что из соотношения (15) в частном случае получают следующие результаты.

Пусть q = 0 (невесомый стержень) и M = 0 (отсутствует скручивающий момент), тогда из формулы (15) находим точное значение критической силы для упругого консольного стержня:

$$P_{кр} = \left(\frac{\pi^2}{4}\right) \frac{EJ}{L^2}. \tag{17}$$

Эта формула получена Леонардом Эйлером в 1744 году (С.П. Тимошенко).

Пусть P = 0 (отсутствует осевая сжимающая сила) и M = 0 (отсутствует скручивающий момент), тогда из формулы (15) находим приближённое значение критического веса упругого консольного стержня:

$$(qL)_{кр} = 7,84 \left(\frac{EJ}{L^2}\right). \tag{18}$$

Точное значение критического веса упругого консольного стержня равно:

$$(qL)_{кр} = 7,83 \left(\frac{EJ}{L^2}\right). \tag{19}$$

Соотношение (19) получено А.Гринхиллом в 1881 году (С.П. Тимошенко, А. Ляв). Отклонение приближённого соотношения (18) от точного (19) составляет менее 2 %.

Пусть M = 0 (отсутствует скручивающий момент), тогда из формулы (17) находим соотношение, которое определяет критическую осевую сжимающую силу для тяжёлого упругого консольного стержня:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2}{4} \frac{EJ}{L^2} - \frac{1}{3}qL. \tag{20}$$

Эта формула впервые получена в работе Н.П. Гришковой в 1928 году.

Пусть q = 0 (невесомый стержень), тогда из формулы (15) находим соотношение:

$$\left(\frac{M}{EJ}\right)^2 + \frac{4P}{EJ} = \frac{\pi^2}{L^2}. \tag{21}$$

Это соотношение впервые строго получено в 1967 году в работе А.П. Мартьянова [20] и определяет значения осевой сжимающей силы (P) и скручивающего момента (M) **при пространственной потере устойчивости для невесомого упругого консольного стержня.**

Таким образом, соотношение (15) является наиболее общим и включает все частные результаты, полученные ранее в работах известных учёных.

Введём безразмерные единицы:

$$EJ = qm^3, \quad L = m\ell, \quad M = qm^2\mu, \quad P_k = qm\rho \tag{22}$$

и запишем соотношение (15) в виде кубического алгебраического уравнения относительно безразмерной длины (ℓ):

$$\ell^3 + 3 \left[ \left(\frac{\mu}{2}\right)^2 + \rho \right] \ell^2 - \frac{3}{4} \pi^2 = 0. \tag{23}$$



Уравнение (23) допускает точное аналитическое решение, но для практических приложений можно использовать какой-либо приближённый метод (например, метод Ньютона) [22].

Введём для краткости и наглядности анализа следующее обозначение:

$$p^* = \left(\frac{\mu}{2}\right)^2 + p. \tag{24}$$

Уравнение (23) можно записать в виде:

$$\ell^3 + 3p^* \ell^2 - 7,3947 = 0. \tag{25}$$

Для практических расчётов в таблицах 1 и 2 приведены значения корней уравнения (25) при малых (табл. 1) и больших (табл. 2) значениях параметра  $p^*$ .

**Таблица 1** – Значения корней алгебраического кубического уравнения (25) при «малых» значениях параметра  $p^*$

$p^*$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1,0	2,0
$\ell$	1,9482	1,8532	1,7674	1,6898	1,6195	1,5556	1,3099	1,0259

**Таблица 2** – Значения корней алгебраического кубического уравнения (25) при «больших» значениях параметра  $p^*$

$p^*$	5	10	15	20	25	30	35	40	50
$\ell$	0,6866	0,4924	0,4036	0,3500	0,3133	0,2819	0,2620	0,2480	0,2219

Отметим, что при больших значениях параметра  $p^*$  ( $p^* > 5$ ) для определения значения критической длины (высоты) опорной стойки можно использовать простую приближённую формулу:

$$\ell = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{p^*}}. \tag{26}$$

Значение параметра  $p^*$  при этом определяется по формуле (24).

### Пример расчёта

В качестве примера расчётов рассмотрим случай, когда морская стационарная платформа состоит из трёх основных частей.

Основание (опорного блока) высотой 42 м, состоящее из стальных труб с наружным диаметром 1420 мм и толщиной стенки 16,5 мм из стали 09Г2С, скреплённых диафрагмами и усиленными рёбрами жёсткости.

Сваи длиной 76 м (на 35 м) забиты в грунт, из стальных труб 1020 мм с наружным диаметром 14 мм из стали 09Г2С.

Верхнего строения длиной 17 м (палубы) для установки технологического оборудования с целью первичной подготовки и дальнейшей транспортировки углеводородов.

Общая масса МСП составляет 1274 тонн.

На опоры действует волновое воздействие, силы собственного веса, выталкивающая сила и дополнительная нагрузка от нарастающих ракушек и водорослей. Максимальная нагрузка на одну опору составляет 1239,3 тонны. При этом принимаем следующее распределение внешних сил:

- собственный вес сваи длиной 76 метров из труб диаметром 1020 мм с толщиной стенки 14 мм составляет 26,3 тс;
- собственный вес верхней части сваи длиной 41 м составляет 14,2 тс;
- вес оборудования равен 63,0 тс;
- вес обрастаний составляет 9,0 тс;
- волновая нагрузка равна 720 тс.

Момент инерции поперечного сечения труб диаметром 1020 мм с толщиной стенки 14 мм равен  $I = 559842 \text{ см}^4$  (ГОСТ 10704-91), а масса одного метра трубы равна 347 кг/м ( $q = 3,47 \text{ кг/см}$ ).

Значение скручивающего момента ( $M$ ) можно принять равным  $M = 82620 \text{ кН} \cdot \text{м}$ . Это значение установлено приближённо на основе анализа основных положений расчёта прочности полупогружных платформ на волнении, которые отражены в статье И.Н. Галахова [23].

В работе И.Н. Галахова [23] приведены важные расчётные значения системы узловых сил, вызывающих общий сдвиг поперечных сечений платформы ( $Q_2$ ) и скручивание ( $Q_3$ ) конструкции платформы:



$$Q_2 = C_{Q_2} \left( \frac{D}{2} \right), \quad C_{Q_2} = 0,06,$$

$$Q_3 = C_{Q_3} \left( \frac{D}{2} \right) L, \quad C_{Q_3} = 0,04,$$

и специально отмечается, что «полученные результаты отражают свойства данной платформы в определённых условиях волнения. При изменении параметров платформы или характеристик волнения расчётные нагрузки могут изменяться» [22].

Из приведённых значений коэффициентов распределения системы узловых сил, вызывающих общий сдвиг поперечных сечений платформы ( $C_{Q_2} = 0,06$ ) и системы узловых сил, вызывающих скручивание конструкции платформы ( $C_{Q_3} = 0,04$ ) видно, что они являются величинами одного порядка, поэтому при значении общей сосредоточенной силы  $P_{сж} = 1239,3$  тонн (максимальная нагрузка на одну опору) для платформы размером 20х20 м (аха) можно приближённо найти значение скручивающего момента по формуле:

$$M = P_{сж} \left( \frac{C_{Q_3}}{C_{Q_2}} \right) \frac{1}{2} a,$$

или 
$$M = 1239300 \left( \frac{0,04}{0,06} \right) \frac{1}{2} 20 = 8262000 \text{ кг} \cdot \text{м} = 82620 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Отметим, что это значение скручивающего момента (M), действующего на морскую стационарную платформу, принято приближённо из-за отсутствия фактических экспериментальных данных.

Для расчётов на прочность полупогружных и стационарных морских платформ весьма важно знать фактические значения узловых сил, вызывающих скручивание конструкции платформ, поэтому необходимо провести соответствующие экспериментальные исследования в этом направлении.

Находим значения параметров:

$$m = \sqrt[3]{\frac{EJ}{q}} = \sqrt[3]{\frac{2,1 \cdot 10^6 \cdot 559842}{3,47}} = 6970 \text{ см} = 69,70 \text{ м};$$

$$p = \frac{P_k}{qm} = \frac{720000 + 63000}{347 \cdot 69,70} = 32,37 \text{ б.е.};$$

$$\mu = \frac{M}{qm^2} = \frac{8262000}{347 \cdot (69,70)^2} = 4,90 \text{ б.е.};$$

$$p^* = \left( \frac{\mu}{2} \right)^2 + p = \left( \frac{4,90}{2} \right)^2 + 32,37 = 38,37 \text{ б.е.}$$

Так как значение  $p^*$  значительно больше  $p^* = 5$ , то можно использовать приближённую формулу (26) и найти критическое значение длины (высоты) опорной стойки:

$$\ell = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{p^*}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{38,37}} = 0,25 \text{ б.е.}$$

или в размерных единицах:

$$L = m\ell = 69,70 \cdot 0,25 = 17,4 \text{ м}.$$

Если не учитывать эффект скручивания конструкции платформы и положить  $M = 0$ , то можно найти значение:

$$\ell = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{p}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{32,37}} = 0,28 \text{ б.е.}$$

или в размерных единицах:

$$L = m\ell = 69,70 \cdot 0,28 = 19,5 \text{ м}.$$

Сравнивая значения  $L = 19,5$  м и  $L = 17,4$  м, можно отметить их отличие на 12 %, которое объясняется действием скручивающего момента на значение критической длины (высоты) опорной стойки блоков МСП.



Расчёты проведены для иллюстрации применения новой методики определения критических значений длины (высоты), или осевой сжимающей силы, действующей на опорную стойку, или скручивающего момента, действующего на конструкцию платформы.

В качестве главного вывода по разделу можно отметить, что впервые предложена приближённая методика расчёта критической длины (высоты) опорной стойки блоков МСП при совместном действии осевых сжимающих сил от собственного веса, волновой нагрузки, веса технологического оборудования и скручивающего момента от циклонической циркуляции морского течения (по Б.В. Штокману) [23–25].

### Литература:

1. Ибрагимов А.М. Анализ причин повреждений и разрушений морских нефтепромысловых гидротехнических сооружений основного типа // За технический прогресс. – 1962. – № 1. – С. 30–33.
2. Сидорченко В.Ф. Морские катастрофы. – СПб. : Центр Пресс, 2006. – 419 с.
3. Statistics of casualties of offshore structures / Maeda Hissaki [et al.] // Navigation. – 1986. – № 87. – P. 2–6.
4. Богдавленский В.И. Чрезвычайные ситуации при освоении ресурсов нефти и газа в Арктике и Мировом океане // Арктика: экология и экономика. – 2014. – № 4 (16). – С. 48–59.
5. Лаверов Н.П., Дмитриевский А.Н., Богдавленский В.И. Фундаментальные аспекты освоения нефтегазовых ресурсов арктического шельфа России // Арктика: экология и экономика. – 2011. – № 1. – С. 26–37.
6. Богдавленский В.И., Лаверов Н.П. Стратегия освоения морских месторождений нефти и газа Арктики // Морской сборник. – 2012. – С. 50–58.
7. Богдавленский В.И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов // Труды Вольного экономического общества. – 2014. – Т. 182. – № 3. – С. 12–17.
8. Латуков С.В. Развитие морской нефтегазодобычи и проблемы безопасности мореплавания // Безопасность мореплавания. – 1986. – № 9 (193). – С. 13–16.
9. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. – М. : ВНИРО, 2017. – 326 с.
10. Григулецкий В.Г., Фурсов А.Ю. Устойчивость опорных стоек блоков морских глубоководных стационарных платформ при освоении нефтяных и газовых месторождений на шельфе // Нефтепромысловое дело. – 2020. – № 2 (614). – С. 66–75.
11. Григулецкий В.Г., Фурсов А.Ю. Устойчивость равновесия системы опорных стоек блоков морских глубоководных стационарных платформ при совместном действии осевых сил и скручивающих моментов от циклонической циркуляции ветра и волн // Нефтепромысловое дело. – 2020. – № 5 (617). – С. 54–61.
12. Григулецкий В.Г. Устойчивость тяжелого упругого стержня, вращающегося в вязкой среде при совместном действии неоднородных скручивающих моментов и осевых сил // Известия АН СССР. Механика твёрдого тела. – 1987. – № 1. – С. 172–177.
13. Григулецкий В.Г., Лукьянов В.Т. Проектирование компоновок нижней части буровой колонны. – М. : Недра, 1990. – 302 с.
14. Мартянов А.П. Некоторые вопросы упругой пространственной потери устойчивости стержней: автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. – М. : МИСИ, 1967. – 7 с.
15. Мартянов А.П. Об устойчивости сжато-скрученных стержней постоянного сечения по длине // Сборник трудов МИСИ. Кафедра сопротивления материалов. Нелинейные задачи сопротивления материалов. – 1967. – № 54. – С. 110–114.
16. Мартянов А.П. К определению критических параметров стержней переменного сечения при сложном нагружении // Сборник трудов МИСИ. Кафедра сопротивления материалов. Нелинейные задачи сопротивления материалов. – 1967. – № 54. – С. 115–118.
17. Николаи Е.Л. Устойчивость прямолинейной формы равновесия сжатого и скрученного стержня // Известия Ленинградского политехнического института. – 1928. – № 31. – С. 201–231.
18. Николаи Е.Л. К вопросу об устойчивости скрученного стержня // Вестник прикладной математики и механики. – 1929. – № 1. – С. 41–58.
19. Болотин В.В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. – М. : Физматгиз, 1961. – 340 с.
20. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. – М. : Гостехтеориздат, 1955. – 568 с.
21. Гришкова Н.П. Влияние собственного веса на продольный изгиб стержней // Вестник инженеров. – 1928. – № 3. – С. 149–152.
22. Григулецкий В.Г. Решение нелинейных уравнений и их систем: монография. – Краснодар : КубГАУ, 2019. – 367 с.
23. Галахов И.Н. Основные положения расчёта прочности полупогружных платформ на волнении // Судостроение. – 1978. – № 8. – С. 12–14.
24. Штокман В.Б. Избранные труды по физике моря. – Л. : Гидрометеиздат, 1970. – 336 с.
25. Штокман В.Б. Ветровой нагон и горизонтальная циркуляция в замкнутом море небольшой глубины // Известия АН СССР. География и геофизика. – 1941. – № 1.
26. Штокман В.Б. Поперечная неравномерность нагонного ветра как одна из важных причин горизонтальной циркуляции в море // Доклады АН СССР. – 1945. – Т. 49. – № 2.

### References:

1. Ibragimov A.M. Analysis of the causes of damage and destruction of offshore oilfield hydraulic structures of the main type // For technical progress. – 1962. – № 1. – P. 30–33.



2. Sidorchenko V.F. Marine disasters. – SPb. : Center Press, 2006. – 419 p.
3. Statistics of casualties of offshore structures / Maeda Hissaki [et al.] // Navigation. – 1986. – № 87. – P. 2–6.
4. Bogoyavlensky V.I. Emergencies during the development of oil and gas resources in the Arctic and the World Ocean // The Arctic: Ecology and Economics. – 2014. – № 4 (16). – P. 48–59.
5. Laverov N.P., Dmitrievsky A.N., Bogoyavlensky V.I. Fundamental aspects of oil and gas resources development of the Russian Arctic shelf // The Arctic: Ecology and Economics. – 2011. – № 1. – P. 26–37.
6. Bogoyavlensky V.I., Laverov N.P. Strategy of development of the Arctic offshore oil and gas fields // Marine Digest. – 2012. – P. 50–58.
7. Bogoyavlensky V.I. The Arctic and the World Ocean: Current State, Prospects and Problems of Hydrocarbon Resources Development // Proceedings of the Free Economic Society. – 2014. – Vol. 182. – № 3. – P. 12–17.
8. Latukov S.V. Development of offshore oil and gas production and problems of safety of navigation // Safety of Navigation. – 1986. – № 9 (193). – P. 13–16.
9. Patin S.A. Oil and ecology of the continental shelf. – M. : VNIRO, 2017. – 326 p.
10. Griguletsky V.G., Fursov A.Yu. Stability of support legs of offshore deep-water stationary platform blocks during the development of oil and gas fields on the shelf // Oilfield Business. – 2020. – № 2 (614). – P. 66–75.
11. Griguletsky V.G., Fursov A.Y. Stability of Equilibrium System of Supporting Struts of Offshore Deep-Sea Fixed Platforms under Joint Action of Axial Forces and Torsional Moments from Cyclonic Wind and Wave Circulation // Oil Field Business. – 2020. – № 5 (617). – P. 54–61.
12. Griguletsky V. G. Stability of a Heavy Elastic Rod Rotating in a Viscous Medium under the Joint Action of Non-Homogeneous Torsional Moments and Axial Forces // Izvestia AS USSR. Mechanics of Solids. – 1987. – № 1. – P. 172–177.
13. Griguletsky V.G., Lukyanov V.T. Designing the layouts of the lower part of a drill string. – M. : Nedra, 1990. – 302 p.
14. Martyanov A.P. Some Issues of Elastic Spatial Loss of Rod Stability: Abstract of Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences. – M. : MISI, 1967. – 7 p.
15. Martyanov A.P. About Stability of Compressed-Twisted Rods of Constant Section along the Length // Collected Works of Moscow State University of Civil Engineering. Department of Strength of Materials. Non-linear Problems of Strength of Materials. – 1967. – № 54. – P. 110–114.
16. Martyanov A.P. To Determination of Critical Parameters of Rods of Variable Section under Complex Loading. Department of Strength of Materials. Nonlinear Problems of Strength of Materials. – 1967. – № 54. – P. 115–118.
17. Nikolai E.L. Stability of a Straight Form of Equilibrium of a Compressed and Twisted Rod // Izvestiya Leningradskogo Polytechnicheskogo Institut. – 1928. – № 31. – P. 201–231.
18. Nikolai E.L. To a Twisted Rod Stability // Bulletin of Applied Mathematics and Mechanics. – 1929. – № 1. – P. 41–58.
19. Bolotin V.V. Non-Conservative Problems of Elastic Stability Theory. – M. : Fizmatgiz, 1961. – 340 p.
20. Timoshenko S.P. The stability of elastic systems. – M. : Gostekhteorizdat, 1955. – 568 p.
21. Grishkova N.P. The Effect of Eigenweights on the Longitudinal Bending of Rods // Engineering Bulletin. – 1928. – № 3. – P. 149–152.
22. Griguletsky V.G. Solution of nonlinear equations and their systems: a monograph. – Krasnodar : KubGAU, 2019. – 367 p.
23. Galakhov I.N. Basic Provisions of Calculation of Strength of Semisubmersible Platforms in Waves // Shipbuilding. – 1978. – № 8. – P. 12–14.
24. Shtokman V.B. Selected Works on Sea Physics. – L. : Hydrometeoizdat, 1970. – 336 p.
25. Shtokman V.B. Wind surge and horizontal circulation in a shallow enclosed sea // Izvestiya AS USSR. Geography and Geophysics. – 1941. – № 1.
26. Shtokman V.B. Transverse non-uniformity of wind surge as one of the important causes of horizontal circulation in the sea//Papers of the USSR Academy of Sciences. – 1945. – Vol. 49. – № 2.