Проектирование и конструкция судов

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-9>
УДК 629.5.017

В.С. Игнатович, А.В. Кузьмина

ИГНАТОВИЧ ВЛАДИЛЕН СЕРГЕЕВИЧ – к. т.н., доцент, SPIN-код: 4976-1975,
AuthorID: 887283, e-mail: v.s.ignatovich@mail.ru
КУЗЬМИНА АННА ВАЛЕНТИНОВНА – старший преподаватель, SPIN-код: 9640-6676,
AuthorID: 887622, e-mail: a.61kuzmina@mail.ru
Кафедра «Океанотехника и кораблестроение»
Севастопольский государственный университет
Университетская ул., 33, Севастополь, Россия, 299053

Анализ факторов нарушения прочности и экологической безопасности эксплуатации плавучих буровых установок

Аннотация: Проанализированы возможные факторы нарушения прочности конструкций СПБУ (самоподъемных плавучих буровых установок), а также обеспечение безопасности их эксплуатации в не предусмотренных расчетами условиях. Рассмотрены методы расчета нагрузок в рабочем положении на СПБУ, определена их расчетная несущая способность, а также устойчивость сооружения на сдвиг в рабочем положении. Проверено выполнение условия на сдвиг сопоставлением нагрузки и предельной несущей способности. Полученные результаты позволяют выбрать метод расчета в зависимости от места и условий эксплуатации СПБУ. Наиболее ответственными и нагруженными конструкциями во всех режимах эксплуатации являются опорные колонны.

Анализ нагрузок, действующих на сооружение, показывает, что опускание опорных колонн приводит к пропорциональному уменьшению изгибающего момента в опорном сечении колонны в корпусе СПБУ. Выполнен анализ прочности наиболее нагруженных опор буровых установок на всех режимах эксплуатации. Самым опасным режимом для опорных колонн является штормовой отстой при действии максимально возможных внешних нагрузок. Опускание колонн в воду на $1/4$ – $1/3$ длины опоры не снижает параметров качки сооружения, однако позволяет уменьшить напряжения в элементах конструкции опор. Максимальные напряжения при выдергивании опор из грунта составляют примерно половину от напряжений при штормовом отстое, что является вполне допустимым и не влияет на безопасность сооружения.

Ключевые слова: буровая установка, повреждение, прочность, сдвиг, опорные колонны, выдергивание опор, штормовой отстой.

Введение

В настоящее время в области разработки морских месторождений углеводородов (нефти и газа) занято большое число самоподъемных плавучих буровых установок (СПБУ), которое непрерывно увеличивается в связи с интенсивным освоением континентального шельфа. Эти сооружения длительное время находятся на точке бурения, в удалении от берега, поэтому могут подвергаться воздействию различных внешних факторов, что приводит к аварийным ситуациям.

© Игнатович В.С., Кузьмина А.В., 2019

О статье: поступила: 13.04.2019; финансирование: бюджет Севастопольского государственного университета.

Эксплуатация современных СПБУ включает следующие режимы работы: походное положение при перегоне из одной точки бурения на другую; рабочее положение и штормовой отстой, когда корпус поднят над поверхностью моря; переход из походного положения в рабочее, при этом опоры опущены и вдавлены в грунт дна; переход из рабочего положения в походное с выдергиванием опор из грунта. В каждом из режимов на сооружение действуют виды нагрузок, вызывающие напряженные состояния в конструкциях СПБУ различной длительности и вероятности возникновения.

Наиболее ответственными и напряженными конструкциями являются опорные колонны, часто подвергающиеся воздействию нагрузок, превышающих расчетные значения при всех режимах эксплуатации. Решению этой проблемы посвящен ряд работ по вопросам конструирования, устойчивости, прочности и обеспечению безопасной эксплуатации СПБУ в условиях ветроволновых воздействий [1, 2, 4, 7]. Однако факторы влияния глубины опускания опор на параметры качки не учитывались.

Цель настоящей статьи – провести анализ возможных факторов нарушения прочности конструкций СПБУ, а также обеспечения безопасности их эксплуатации в непредусмотренных расчетах условиях.

К трем основным причинам, вызывающим возникновение рисков нарушения прочности, надёжности и экологической безопасности при эксплуатации морских сооружений, относятся следующие.

1. Внешние повреждения ПБУ и МСП (морских стационарных платформ) в результате их столкновения с судами и падения на палубу ПБУ вертолетов в случае аварий, а также вследствие штормов, несоблюдения требований безопасности буксировки и монтажа стационарных платформ в море. Последствия таких повреждений могут быть достаточно тяжёлыми (например, длительный и дорогостоящий ремонт).

2. Аварии, связанные непосредственно с буровыми работами, обустройством скважины и эксплуатацией бурового и устьевого оборудования и приводящие к возможному открытому фонтанированию скважины, воспламенению аварийного фонтана и даже к гибели установки. При этом выбросы углеводородов могут серьёзно нарушить экологическое состояние морской среды.

3. Несоблюдение требований по прочности и надёжности сооружения, качеству проектирования, технологии постройки, отсутствие должного уровня контроля состояния конструкций при различных режимах эксплуатации.

Анализ статистики аварий ПБУ показывает, что одной из главных причин нарушения требований эксплуатации сооружений и технологического оборудования является человеческий фактор (невыполнение требований норм инструкций, требований Правил Регистра РФ, недостаточная подготовка личного состава и бригад, выполняющих буровые работы, ошибки при проектировании и строительстве ПБУ). Поэтому для снижения вероятности возникновения потенциальных рисков аварийных ситуаций, приводящих к серьёзным повреждениям сооружения и к нарушению экологии окружающей морской среды, необходимо повысить качество профессиональной подготовки обслуживающего персонала и обеспечить строгое соблюдение производственной дисциплины при всех эксплуатационных режимах.

Анализ нагрузок, действующих на СПБУ в штормовых условиях

Нагрузки, действующие на СПБУ в штормовых условиях, – фактор нарушения прочности. Как правило, режим жестокого шторма с обеспеченностью 10^{-6} , т.е. вероятностью превышения максимальных нагрузок за время эксплуатации сооружения, является расчетным для прочности корпуса, опорных колонн сооружения и его устойчивости на грунте, в частности на сдвиг. Изгибающие моменты, возникающие в узлах соединения опорных колонн с корпусом, передаются на конструкции корпуса в виде горизонтальных реакций.

Рассмотрим два метода расчета нагрузок, вызывающих опасный сдвиг сооружения при действии максимальных горизонтальных сил (ветра, волнения, течения), в рабочем положении. Согласно Нормам [9] все нагрузки подразделяются на 4 группы:

- постоянные (вес конструкции, гидростатическое давление и др.), действующие на сооружение в течение всего срока эксплуатации;
- длительные (вес груза, оборудования, воды и др.) – переменные нагрузки, связанные с функционированием и эксплуатацией сооружения;
- кратковременные (нагрузки окружающей среды), действующие в течение секунд, минут, часов;
- особые – отвечающие максимальной толщине льда или скорости ветра.

Основные сочетания включают постоянные, длительные нагрузки и возможное действие кратковременных. Особые сочетания включают постоянные нагрузки, все типы временных нагрузок, совместное действие которых возможно, и только одну особую нагрузку (вероятность двух особых нагрузок, например землетрясение и волнение, с повторяемостью 1 раз в 100 лет чрезвычайно мала и может не учитываться). Поэтому каждая из временных нагрузок должна умножаться на коэффициент меньше единицы (табл. 1).

Таблица 1

Сочетания нагрузок и коэффициентов

Основные сочетания		
Постоянные 1,0	Длительные 0,95	Кратковременные $(fr_1) \cdot 1,0 + (fr_2) \cdot 0,8 + (fr_3) \cdot 0,6$
Особые состояния		
1,0	0,95	$(\text{Особые}) \cdot 1,0 + (fr_1) \cdot 0,8$
fr_1, fr_2 и т.д. – частные кратковременные нагрузки со средними параметрами в порядке важности		

По классу надежности сооружения могут быть разделены согласно нормам: Российской Федерации – на 4 класса, Канады – на 2 класса:

I класс: если при рассматриваемых условиях повреждение приведет к большому риску для жизни и загрязнению окружающей среды;

II класс: если при рассматриваемых условиях повреждение приведет к малому риску для жизни и к загрязнению окружающей среды.

По нормам Российской Федерации все шельфовые сооружения относятся к I классу надежности.

Следующая ступень в проектировании состоит в определении расчетной несущей способности. В российских и западных нормах различают две группы предельных состояний:

1 группа – полная непригодность к дальнейшей эксплуатации (потеря равновесия, невозможность восприятия нагрузок сооружением и его элементами из-за превышения прочности, а также потери устойчивости материала);

2 группа – предельное состояние эксплуатационной пригодности, т.е. непригодность к нормальной эксплуатации (вибрация, местные повреждения, не приводящие к выходу из строя всего сооружения, смещение сооружения).

Сопоставление нагрузки и предельной несущей способности является последним этапом проектирования, в котором проверяется выполнение условия на сдвиг,

$$c \cdot F \leq \frac{R \cdot k}{n}, \quad (1)$$

где F – расчетная нагрузка, соответствующая учитываемой расчетной несущей способности R сооружения (прочность или устойчивость);

c – коэффициент сочетания: 1,0 – для основных сочетаний, 0,9 – для особых сочетаний при расчете по 1-й группе и 1,0 – для 2-й группы предельных состояний независимо от типа сочетаний;

k – коэффициент условий работы;

n – коэффициент, учитывающий класс надежности сооружения (для 1-го класса надежности – 1,25 при расчете по 1-й группе предельных состояний и 1,0 – по 2-й группе).

Рассмотрим пример проверки устойчивости сооружения (СПБУ) на сдвиг по двум методикам, учитывающим нагрузки на СПБУ (табл. 2).

Таблица 2

Нагрузка на СПБУ, МН

Характер нагрузки	Постоянная	Длительная	Кратковременная	
			Средняя	Максимальная
Вес сооружения G	600	-	-	-
Оборудование $G_{об}$	-	200	-	-
Ветер W	-	-	10	22
Ветровые течения W_{dc}	-	-	16	20
Приливные течения t_c	-	-	15	25
Волнение W_v	-	-	130	180
Лед I	-	-	150	300
Землетрясение E	-	-	-	400
Коэффициент трения сооружения о грунт f	0,5			

Определить устойчивость сооружения на сдвиг в рабочем положении.

Основное сочетание 1:

$$F_1 = (W_v + W_{dc} + W)_{av} \cdot 1 + (t_c)_{av} \cdot 0,8 = (130 + 16 + 10) \cdot 1 + 15 \cdot 0,8 = 168 \text{ МН.}$$

Основное сочетание 2:

$$F_2 = (I)_{av} \cdot 1 + (t_c)_{av} \cdot 0,8 + (W)_{av} = 150 \cdot 1 + 15 \cdot 0,8 + 10 \cdot 0,8 = 168 \text{ МН}$$

(волнение и ветровые течения не могут быть включены в одно сочетание).

Особое сочетание 1:

$$F_3 = (W_v + W_{dc} + W)_m \cdot 1 + (t_c)_{av} \cdot 0,8 = (180 + 20 + 22) \cdot 1 + 15 \cdot 0,8 = 234 \text{ МН.}$$

Особое сочетание 2:

$$F_4 = (I)_m \cdot 1 + (t_c)_{av} \cdot 0,8 = 300 \cdot 1 + 15 \cdot 0,8 = 312 \text{ МН.}$$

Особое сочетание 3:

$$F_5 = E \cdot 1 + (I)_m \cdot 0,8 = 400 \cdot 1 + 150 \cdot 0,8 = 520 \text{ МН.}$$

Несущая способность СПБУ определяется по формуле (1).

Сочетание нагрузок в вертикальном направлении:

$$Z_1 = G \cdot 1 + G_{об} \cdot 0,9 = 600 \cdot 1 + 200 \cdot 0,9 = 780 \text{ МН.}$$

Несущая способность ($c = 0,9$) грунта в горизонтальном направлении на сдвиг

$$R = 0,9 \cdot Z_1 \cdot f = 0,9 \cdot 780 \cdot 0,5 = 351 \text{ МН.}$$

Устойчивость сооружения ($c = 1,0$; $k = 1,0$) для основного сочетания 1 или 2:

$$1 \cdot 168 \leq \frac{351 \cdot 1}{1,25} = 280,8 \text{ МН.}$$

Устойчивость сооружения для особого сочетания 3 (как максимального):

$$0,9 \cdot 520 = 468 \geq \frac{351 \cdot 1}{1,25} = 280,8 \text{ МН.}$$

Таким образом, сооружение устойчиво на основное сочетание нагрузок и неустойчиво – на особое.

В соответствии с Правилами Регистра [8] проверка СПБУ на сдвиг учитывает максимальные значения ветра, волнения, течения и выполняется по формуле

$$K_c = \frac{P \cdot f}{T} > 1,50, \quad (2)$$

где K_c – коэффициент запаса;

P – сумма максимальных вертикальных внешних сил, действующих на установку в рабочем положении;

$f = 0,5$ – коэффициент трения грунта;

T – сумма горизонтальных усилий.

Для рассматриваемого случая

$$K_c = \frac{(600 + 200) \cdot 0,5}{(22 + 20 + 25 + 180)} = 1,62 > 1,50.$$

Условие устойчивости на сдвиг обеспечено при одновременном максимальном действии ветра, волнения и течения.

Полученные результаты по методике [9] позволяют оценить устойчивость сооружения на сдвиг при различных сочетаниях всех возможных нагрузок на СПБУ в зависимости от места и условий их эксплуатации. Поэтому методика СНИП может быть рекомендована для дополнительной проверки сооружения к расчетам по Правилам Регистра.

Методы обеспечения прочности опорных колонн в походном положении

В опыте буксировки судов имеются некоторые повторяющиеся элементы, которые встречаются и в процессе буксировки морских сооружений, хотя географические районы, погодные условия, водоизмещение и конструкция объектов, типы и число буксиров, а также организация перегона будут меняться. Поэтому определение количественной оценки риска без включения в него перечисленных элементов невозможно.

Ошибка при буксировке привела к трагедии в Охотском море, которая произошла 18 декабря 2011 года при перегоне буровой платформы «Кольская», принадлежащей компании «Арктикморнефтегазразведка», с точки бурения на о. Сахалине с помощью ледокола и транспортно-буксирного судна. На 16 декабря погода ухудшилась, но ответственным за буксировку было принято решение увеличить скорость движения, что привело к возрастанию нагрузок на корпус и образованию трещин в наружной обшивке, через которые в корпус стала поступать вода (рис. 1).

Установка получила дифферент на нос. В результате последующее нарушение герметичности водонепроницаемых закрытий на верхней палубе привело к затоплению балластных цистерн, поступлению воды в машинное отделение и опрокидыванию установки на глубине более 1000 м. Из 67 человек, находившихся на борту, были спасены только 14.

В случае возможного ужесточения метеорологических условий в процессе буксировки целесообразно при разработке маршрута предусмотреть места стоянки и выхода СПБУ в рабочее положение при необходимой глубине и удовлетворительном состоянии рельефа дна моря. Однако в большинстве случаев необходимо принимать меры по снижению нагрузок, связанных с увеличением волнения и ветра, при движении установки на плаву. Считается, что для снижения качки СПБУ и уменьшения инерционных нагрузок целесообразно опустить опорные колонны на глубину до 30 м.

Рис. 1. Гибель в Охотском море буровой платформы «Кольская» [3].

С целью проверки этого положения мы исследовали параметры качки СПБУ с четырьмя опорами ферменной конструкции для глубины моря 72 м: при опускании опор в походном положении на 3,1 м; 13,1; 23,1 и 33,1 м (табл. 3).

Таблица 3

Исходные данные

Параметры установки		СПБУ с полными походными и судовыми запасами, с буровым блоком по-походному			
Заглубление опор относительно основной плоскости, м		3,1	13,1	23,1	33,1
Водоизмещение Δ , т		12150	12150	12150	12150
Осадка d , м		4,79	5,37	5,37	5,35
Метацентрические высоты	h , м	22,89	24,56	27,63	30,52
	H , м	32,69	34,05	37,12	40,01
Моменты инерции массы относительно нейтральных осей	$i_{xx}, m^2 \times 10^6$	8,87	6,71	5,72	5,43
	$I_{yy}, m^2 \times 10^6$	9,07	6,91	5,92	5,44
Период собственных колебаний	T_θ , с	12,3	10,3	10,2	11,0
	T_φ , с	11,25	9,6	10,1	10,5

Результаты расчета параметров качки СПБУ для указанных заглублений опор относительно поверхности воды приведены на рис. 2.

Рис. 2. Зависимость амплитуд бортовой $\theta_{3\%}$ (слева) и килевой $\psi_{3\%}$ (справа) качки от высоты волны $h_{3\%}$, м при опускании опор на $h_1 = 3,1$ м; $h_1 = 13,1$ м; $h_1 = 33,1$ м.

Зависимости амплитуд бортовой и килевой качки СПБУ в заданном диапазоне заглублений опор практически не отличаются от этих параметров для установки с полностью поднятыми опорами, т.е. заглубление опор при буксировке на волнении не снижает параметры качки сооружения.

Для оценки инерционных усилий, вызывающих изгиб опорных колонн СПБУ от крена (1) и дифферента (2), направленных нормально к их оси, можно воспользоваться выражениями [10]:

$$P_y = Q \cdot \frac{4\pi^2}{g \cdot T_\theta^2} \cdot [\theta_{\max} \cdot z + r \cdot \sin \theta_{\max}] + Q \cdot \sin \theta_{\max} + F, \quad (3)$$

$$P_x = Q \cdot \frac{4\pi^2}{g \cdot T_\psi^2} \cdot [\psi_{\max} \cdot z + r \cdot \sin \psi_{\max}] + Q \cdot \sin \psi_{\max} + F, \quad (4)$$

где Q – вес участка колонн, вызывающего усилие P , т,

T_θ , T_ψ – период Q бортовой и килевой качки СПБУ с полностью поднятыми опорами, с,

$\theta_{\max}$, $\psi_{\max}$ – наибольший угол бортовой и килевой качки СПБУ с полностью поднятыми опорами, рад,

r – полуввысота волны, м,

z – возвышение центра тяжести участка колонны над центром тяжести СПБУ, м,

F – усилия от давления ветра, т/м².

При этом выступающая над верхней опорой опорно-подъемного устройства (ОПУ) часть опорной колонны разбивается на несколько равных участков, а центр тяжести находится посередине этих участков.

Результат расчетов – определение перерезывающих сил и изгибающих моментов в сечениях между участками колонн. Анализ нагрузок, действующих на сооружение, показывает, что опускание опорных колонн приводит к уменьшению изгибающего момента в опорном сечении колонны в корпусе СПБУ.

Расчет прочности опорных колонн при выходе из грунта

В соответствии с Правилами Регистра [8] при проектировании СПБУ необходимо выполнить проверку прочности опорных колонн в режиме выдергивания из грунта при снятии с точки бурения. Рассмотрим процесс снятия с точки отечественной СПБУ «Арктическая», установленной на трех опорах и предназначенной для бурения разведочных скважин при глубине моря от 7 до 100 м. Характеристики ОПУ (опорно-подъемного устройства): тип опор – трехгранные ферменные конструкции с расстояниями между осями стоек 10 м, длина опоры 138,85 м; механизм подъема – электромеханический, с допускаемой подъемной массой при подъеме понтона 13800 т [5].

Корпус опускают на воду с помощью механизмов ОПУ, а затем ниже ватерлинии увеличивают его осадку. В результате этого возникают дополнительные выталкивающие силы (силы поддержания), передающиеся на опоры. Эти силы преодолевают сопротивление грунта и веса опор; башмаки отделяются от грунта – и опоры поднимаются относительно корпуса. При этом возможны различные случаи отрыва опор: одновременный отрыв от грунта и подъем всех опор, последовательный отрыв и подъем отдельных опор.

Расчет нагрузок при одновременном выходе из грунта всех опорных колонн

Для определения действующих напряжений в опорных колоннах и усилий, воспринимаемых элементами подъемного механизма и поверхностями направляющих корпуса и портала в режиме штормового отстоя, мы использовали программный комплекс ANSYS, предназначенный для решения задач методом конечных элементов.

Полагаем, что силы поддержания равномерно распределены между опорами, $n=3$. Корпус погружается в воду без крена и дифферента на предельно допустимую величину до кромки верхней палубы Δd , м.

Максимальная дополнительная сила поддержания

$$P = \gamma \cdot \Delta d \cdot S_n = 8698 \text{ т},$$

где S_n – площадь ватерлинии (ВЛ) корпуса за вычетом проемов для опор и технологического оборудования.

Сила поддержания, приходящаяся на одну опору, приложенная в районе зацепления зубьев рейки и механизмов ОПУ с учетом веса колонны в воде G_o :

$$P_1 = \frac{P}{n} + G_o = 2981 \text{ т}.$$

Неравномерность усилий в опорах можно учесть коэффициентом $K=1,1 \div 1,2$.

В условиях принятого погружения корпуса нагрузки можно считать предельными, а допускаемые напряжения – равными пределу текучести материала стоек опор (стали АБ1 (F500Z), $R_{EH} = 490$ МПа).

Максимальные напряжения, определенные по программе ANSYS (метод конечных элементов), составляют $61,1 \div 62,1$ МПа и равномерно распределены по длине вертикальных стоек.

Расчет прочности при выходе из грунта одной носовой опорной колонны

При работе механизмов подъема на опускание понтон погружается в воду с углом дифферента в сторону оставшихся в грунте опор на глубину, когда ВЛ (ватерлиния) проходит через линию пересечения транца с верхней палубой. Равнодействующая сил поддержания, приложенная в центре величины, вызовет момент относительно сечения корпуса, проходящего через верхние концы оси опор. Через узлы механизма подъема этот момент пере-

дается в виде пары сил на обе опоры. Опору можно рассматривать как жестко защемленную в грунте колонну и жестко соединенную с корпусом через механизм ОПУ. В качестве необходимого условия следует принять допустимую величину осадки корпуса в районе транца, максимальное значение которой будет при совмещении ВЛ с верхней палубой.

Высота надводного борта в районе транца будет равна:

$$\Delta d = H - d = \Delta d_n + \Delta d_\psi, \quad (5)$$

где Δd_n – осадка, вызванная равномерным погружением корпуса при работе механизмов подъема;

Δd_ψ – осадка, полученная в результате дифферента корпуса;

d – осадка корпуса.

Сила поддержания, обеспечивающая выход колонны из грунта:

$$P = \frac{H - d}{\frac{1}{\gamma \cdot S_n} + \frac{1}{D \cdot H_o} \cdot \left(\frac{l_{\text{кол}}}{2} \pm x_c \right) \cdot \left(\frac{L}{2} \pm x_c \right)} = 1040 \text{ т},$$

где $l_{\text{кол}}$ – расстояние между опорами.

Изгибающий момент в опорной колонне:

$$M = \frac{E \cdot I_k \cdot (H - d)}{l_k \cdot \left(\frac{D \cdot H_o}{\gamma \cdot S_n} \pm \frac{L}{2} \pm x_c \right)} = 175400 \text{ тм},$$

где $D = 23170 \text{ т}$ – водоизмещение СПБУ с учетом выдернутых из грунта опор;

$H_o = 16,2 \text{ м}$ – продольная метацентрическая высота СПБУ для соответствующего положения опор;

l_k – длина опоры;

I_k – момент инерции поперечного сечения опоры.

Максимальные напряжения на внешней стороне стойки опорной колонны в нижней точке направляющих корпуса, определенные по программе ANSYS, составляют 117–120 МПа.

Максимальные напряжения в стойках опорной колонны при действии штормовых нагрузок на СПБУ составляют 210–213 МПа, т.е. прочность опорных колонн при выходе из грунта обеспечена, и напряжения не превышают допускаемых.

Выводы

Итак, мы полагаем, что при анализе факторов нарушения прочности СПБУ и обеспечения безопасности в нештатных условиях для получения объективной оценки внешних нагрузок и рекомендаций по безаварийной эксплуатации элементов конструкции целесообразно использовать комплексный подход, включающий различные методы расчетов строительной механики корабля и морских сооружений с учетом требований нормативных документов.

В процессе буксировки и эксплуатации СПБУ подвергаются самым разнообразным внешним воздействиям, связанным с возникновением рисков аварийных ситуаций, приводящих к серьезным нарушениям экологической безопасности. Это внешние повреждения ПБУ и МСП в результате их столкновения с судами; аварии вертолетов и их падение на палубу ПБУ; следствие штормов; несоблюдение требований безопасных буксировки и монтажа стационарных платформ в море. Последствия таких повреждений могут быть достаточно тяжелыми для сооружений и повлечь длительный и дорогостоящий ремонт. Надёжность и прочность сооружения зависят от качества проектирования, технологии постройки и должного уровня контроля состояния конструкций при различных режимах эксплуатации. Также к

факторам нарушения экологической безопасности следует отнести аварии, непосредственно связанные с буровыми работами, обустройством скважины и эксплуатацией бурового и устьевоего оборудования и приводящие к возможному открытому фонтанированию скважины, воспламенению аварийного фонтана и даже к гибели установки. При этом выбросы углеводородов могут серьезно нарушить экологическое состояние морской среды. Причиной подобных аварий во многих случаях служит человеческий фактор.

При проверке устойчивости СПБУ на сдвиг при штормовом отстое целесообразно использовать методику СНиПа и Правил Регистра. Методика СНиПа позволяет учесть не только действие максимальных нагрузок, но и наиболее опасные сочетания всех нагрузок, действующих на СПБУ.

Анализ прочности наиболее нагруженных опор СПБУ на всех режимах эксплуатации показывает, что самым опасным режимом для опорных колонн является штормовой отстой при действии максимально возможных внешних нагрузок.

При буксировке СПБУ возможно значительное превышение допустимого волнения. Опускание колонн в воду на $1/4$ – $1/3$ длины опоры не снижает параметров качки сооружения, однако позволяет уменьшить напряжения в элементах конструкции опор.

Сравнение результатов расчетов усилий, действующих на опорные колонны при выдергивании из грунта, показывает, что максимальные напряжения в этом случае ($\sigma = 117$ МПа) составляют примерно половину от напряжений при штормовом отстое ($\sigma = 213$ МПа), что вполне допустимо и не влияет на безопасность сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алисейчик А.А., Галахов И.Н., Литонов О.Е. Плавучие буровые платформы. Конструкция и прочность. Л.: Судостроение, 1981. 224 с.
2. Буров А. Состояние аварийности на флоте и меры ее профилактики // Морской флот. 2003. № 1. С. 14–16.
3. Дело о гибели платформы «Кольской». URL: <https://regnum.ru/news/1922507.html> (дата обращения: 14.01.2019).
4. Душко В.Р., Хомич А.И., Янковский А.С. Основные направления решения комплексной задачи обеспечения безопасной эксплуатации морских буровых платформ на шельфе Азово-Черноморского бассейна // Совершенствование проектирования и эксплуатации морских судов и сооружений: материалы IV Всеукр. студ. науч.-техн. конф., Севастополь, 2–5 декабря 2009 г. Севастополь, 2009. С. 136–138.
5. Игнатович В.С., Василенко А.В. Некоторые вопросы безопасности самоподъемных плавучих буровых установок // Актуальные вопросы проектирования, постройки и эксплуатации морских судов и сооружений: тр. регион. науч.-практ. конф., Севастополь, 15–16 ноября 2017 г. / науч. ред. В.И. Истомина. Севастополь: Севастоп. гос. ун-т, 2018. С. 100–109.
6. Инструкция по предупреждению газонефтеводопроявлений и открытых фонтанов при строительстве и ремонте скважин в нефтяной и газовой промышленности (РД 08-254-98). Сер. 08. Вып. 16. М.: НТЦ исследований проблем промышленной безопасности, 2010. 32 с.
7. Лившиц Б.Р. Определение пенетрации опорных колонн самоподъемной плавучей буровой установки в грунт // Строительство и техногенная безопасность. 2011. № 40. С. 13–20.
8. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ // Российский морской регистр судоходства. СПб.: Транспорт, 2018. 454 с.
9. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменением N 1). URL: <http://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения: 24.05.2019).
10. Шиманский Ю.А. Динамический расчет судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1963. 444 с.

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-9>

Ignatovich V., Kuzmina A.

VLADILEN IGNATOVICH, Candidate of Engineering Science, Associate Professor,
e-mail: v.s.ignatovich@mail.ru

ANNA KUZMINA, Senior Teacher, Graduate Chair, e-mail: a.61kuzmina@mail.ru

Department of Ocean Technology and Shipbuilding

Sevastopol State University

33 University St., Sevastopol, Russia, 299053

Analysis of factors affecting the strength and environmental operational safety of floating drilling rigs

Abstract: In this paper the authors analyze possible factors of structural strength failure of the self-elevating floating drilling rigs, as well as ensuring the safety of their operation under conditions not provided for by the calculations. The methods of calculating the loads under the operating mode of a self-elevating floating drilling rig were considered, the calculated bearing capacity was determined, as well as the shear stability of the structure in the working position. The shear condition was verified by comparing the load and the ultimate bearing capacity. The obtained results allow choosing the method of calculation depending on the place and operation conditions of a self-elevating floating drilling rig. The support columns turned out to be the most critical and loaded structures in all modes of operation.

Analysis of the loads acting on the structure shows that lowering of the support columns leads to a proportional decrease in the bending moment in the supporting section of the column in the body of the self-elevating floating drilling rig. The strength analysis of the most loaded supports of drilling rigs in all modes of operation was performed. The most dangerous mode for support columns is the storm sludge under the influence of the maximum possible external loads. Lowering the columns into the water by 1/4–1/3 of the support length does not reduce the heave parameters of the structure. However, it allows reducing stresses in the structural elements of the supports. The maximum stresses when pulling out supports from the ground are about half of the stresses in case of storm sludge, which is completely acceptable and does not affect the safety of the structure.

Keywords: drilling rig, damage, strength, shear, support columns, leg pulling, storm holding anchorage, multifaceted approach.

REFERENCES

1. Aliseychik A.A., Galakhov I.N., Litonov O.E. Floating drilling platforms. Design and strength. Leningrad, Shipbuilding, 1981, 224 p.
2. Burov A. The accident rate in the fleet and the measures for its prevention. *Sea Fleet*. 2003;1:14–16.
3. The case of the death of the *Kola* platform. URL: <https://regnum.ru/news/1922507.html>. – 01.14.2019.
4. Dushko V.R., Khomich A.I., Yankovsky A.S. Main directions for solving the complex task of ensuring the safe operation of offshore drilling platforms on the shelf of the Azov-Black Sea basin. *Improving the design and operation of ships and structures: materials of the IV All-Ukrainian Student Scientific and Technical Conference*, Sevastopol, December 2–5, 2009. Sevastopol, 2009, p. 136–138.
5. Ignatovich V.S., Vasilenko A.V. Some safety issues for self-lifting floating rigs. Topical issues of design, construction and operation of ships and structures: the works of the region. Scientific and Technical Conference, Sevastopol, November 15–16, 2017 Sevastopol, Sevastopol State Univ., 2018, p. 100–109.

6. Instructions for the prevention of gas and oil shows and open fountains during the construction and repair of wells in the oil and gas industry (RD 08-254-98). Series 08, vol. 16. M., Scientific and Technical Center for Industrial Safety Research, 2010, 32 p.
7. Livshits B.R. Determination of penetration of supporting columns of a self-lifting floating drilling rig into the ground. Construction and Technological Safety. 2011;40:13–20.
8. Rules for the classification, construction and equipment of floating drilling rigs and offshore fixed platforms. Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg., Transport, 2018, 454 p.
9. SP 20.13330.2016. Loads and impacts. Updated version of SNiP 2.01.07-85 * (with a Change in N 1). URL: <http://docs.cntd.ru/document/456044318> - 05.24.2019.
10. Shimansky Yu.A. Dynamic calculation of ship designs. Leningrad, Shipbuilding, 1963, 444 p.