

УДК 629.124.74:622.242

В.С. Игнатович, доцент, канд. техн. наук,

В.В. Вакерина, К.В. Абрамян

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ В УЗЛАХ ПРОЧНОСТИ ОПОРНО-ПОДЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ САМОПОДЪЕМНЫХ ПЛАВУЧИХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

Исследуется прочность основных узлов опорно-подъемного устройства самоподъемных плавучих установок при максимальных внешних силах, действующих в режиме штормового отстоя.

Ключевые слова: самоподъемная плавучая буровая установка (СПБУ), опорно-подъемное устройство, опора, рейка, жесткость, напряжение.

Опорно-подъемное устройство (ОПУ) является одной из наиболее сложных и ответственных частей самоподъемной плавучей буровой установки (СПБУ), трудоемкость, стоимость и масса которой составляет 30-40 % от всего сооружения. В состав опорно-подъемного устройства (ОПУ) входят следующие конструкции и оборудование: опоры, механизм подъема и спуска с порталом, фиксирующее устройство (не на всех самоподъемных плавучих буровых установках).

В статье рассматриваются самоподъемные плавучие буровые установки (СПБУ) для глубин море более 90 м. Опора таких установок состоит из основной части (колонны) и опорной части (башмака). Колонна имеет ферменную конструкцию и представляет собой трехгранную призму с раскосами и стойками трубчатого профиля. Башмак служит для уменьшения нагрузки на опору от веса самоподъемной плавучей буровой установки (СПБУ) и равномерного распределения её на грунт. Форма и размер башмака имеют большое значение и зависят от типа грунта [1].

Наряду с множеством конструкций опор существуют различные типы механизмов подъема и реек. Однако при всем их разнообразии они выполняют одинаковые функции, основными из которых являются: подъем-опускание опор относительно находящегося на плаву корпуса; подъем-опускание корпуса по опертым на грунт опорам; удержание корпуса над водой в рабочем режиме и при штормовом отстое.

По типу привода механизмы подъема бывают гидравлические и электромеханические. Наиболее распространенными являются опорно-подъемные устройства (ОПУ) с электромеханическими механизмами подъема, отличающиеся от гидравлических большей надежностью и более простой схемой управления. Электромеханический механизм подъема состоит из портала и редукторов. Редукторы размещаются в нишах по углам портала в несколько ярусов и опираются сверху и снизу на металлические конструкции или на резинометаллические пластинчатые амортизаторы. Резинометаллические амортизаторы служат для выравнивания нагрузок и равномерного их распределения между приводными шестернями.

Выходные шестерни каждого редуктора механизма подъема входят в зацепление с рейками, приваренными по всей длине опор. При вращении выходных вал-шестерен рейки перемещаются вверх и вниз в зависимости от направления вращения вал-шестерен. Тип механизма определяет конфигурацию сопрягающихся узлов механизма подъема и опоры, оказывает влияние на ее конструкцию. В походном и рабочем положениях опоры необходимо закреплять, тем самым разгружая механизм подъема и передавая нагрузку на корпусные конструкции. Поэтому на некоторых самоподъемных плавучих буровых установках (СПБУ) используются фиксирующие устройства в виде упоров, реек и т.п. При действии внешних нагрузок (ветер, волнение, течение) в узлах соединения верхнего корпуса с опорами возникает момент, который воспринимается упомянутыми выше частями опорно-подъемного устройства (ОПУ): опорами, элементами механизмами подъема и фиксирующим устройством. Распределение момента между этими частями опорно-подъемного устройства (ОПУ) зависит от их жесткости и влияет на их прочность.

Цель статьи заключается в исследовании прочности опор самоподъемной плавучей буровой установки (СПБУ) при различных вариантах жесткости элементов опорно-подъемного устройства (ОПУ) и подборе жесткости амортизаторов, при которой обеспечивается оптимальное распределение нагрузок и наибольший запас прочности. Объектом исследования является «Арктическая», на базе конструкции которой выполняется анализ расчетных вариантов, а предметом исследования – опорно-подъемное устройство, на примере которых производится изучение влияния жесткости различных типов элементов системы подъема и расчеты действующих нагрузок и напряжений.

Самоподъёмная плавучая буровая установка «Арктическая», предназначенная для эксплуатации на глубинах до 100 м (рисунок 1), имеет следующие основные характеристики: длина и ширина корпуса 88 и 66 м; высота борта 9,7 м; общий вес 16000 т; количество ферменных трехгранных опор, размером 10×10 – 3; механизмы подъема – электромеханические – 3, каждый включает 3×8 редукторов.

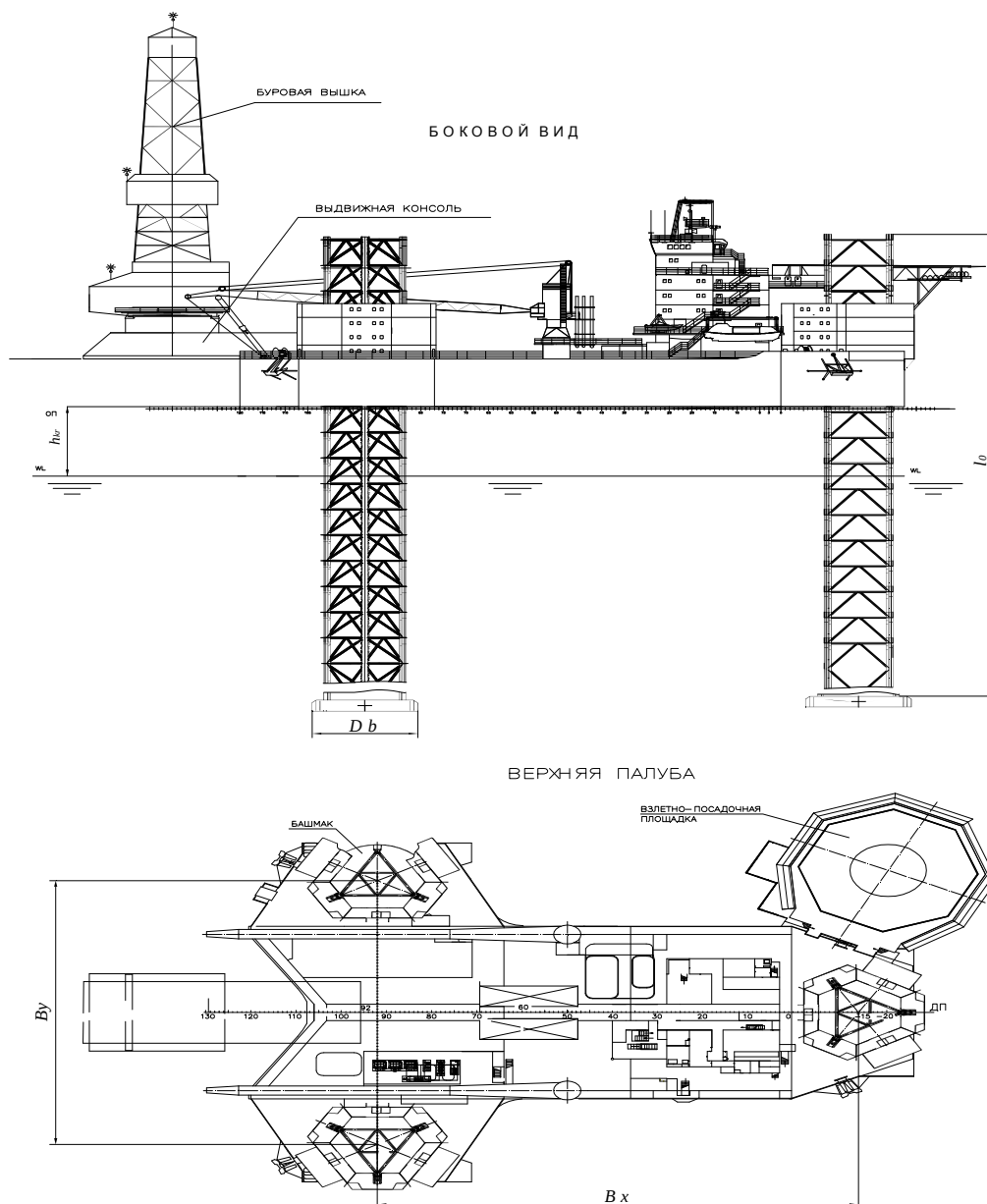


Рисунок 1 – Общий вид СПБУ «Арктическая»

В режиме штормового отстоя самоподъёмная плавучая буровая установка подвергается действию внешних нагрузок, величина которых определяется в соответствии с рекомендациями [2].

В качестве расчетных условий принят режим выживания или экстремального нагружения. Для буровой установки экстремальными ветровыми, волновыми и нагрузками от течения считаются вероятные из максимальных внешних нагрузок, могущих воздействовать на сооружение за 100-летний период. За расчётные принимаются значения переменных нагрузок, вероятность превышения которых в долговременном распределении принимается равной 10^{-8} .

При направлении ветро-волнового воздействия под углом 45° принимается высота волны 3-процентной обеспеченности один раз в 100 лет, равная – 12 м, период волнения – 11 с, коэффициенты ветровых и волновых нагрузок 1,7 и 2,29; расчётная длина волны 188,3 м, скорость течения – 0,5 м/с.

Расчётная схема нагрузок на опорно-подъёмное устройство приведена на рисунке 2.

Условия равновесия горизонтальных и вертикальных усилий и их моментов относительно линии, проходящей через точки крепления опор в грунте, позволяют выполнить расчёт нагрузок, действующих

на опорно-подъёмное устройство и получить следующие результаты: момент в заделке рамы 257483 кНм, момент на пяте опоры 110350 кНм, горизонтальная и вертикальная реакция на пяте опоры 3179 и 65259 кН. Реакции на пяте опоры используются как нагрузки на опору для определения горизонтальных и вертикальных сил на шестерни и направляющие корпуса и портала.

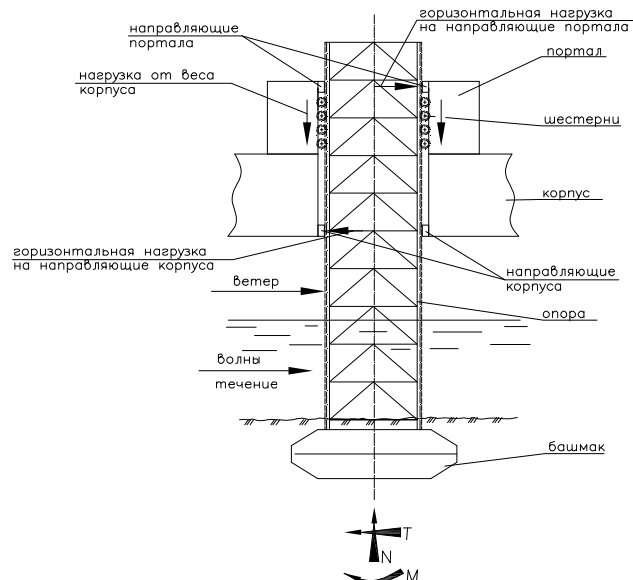


Рисунок 2 – Расчетная схема нагрузок опорно-подъемного устройства(ОПУ)

При рассмотрении распределения усилий в опорно-подъёмном устройстве (ОПУ) необходимо учесть, что силы в опоре являются почти полностью осевыми нагрузками в хордах (рейках), за исключением срезающего усилия вследствие местного воздействия ветра, волн и течения, которое должно распределяться поперечными связями. Как эти силы воспринимаются корпусом, зависит, главным образом, от системы подъёма направляющих и других устройств крепления.

Подвижно закреплённые механизмы подъёма (рисунк 3) будут иметь тенденцию поворачиваться при отклонениях опор, вызванных нагрузками от опрокидывающего момента, и потребуются нижние направляющие, которые могут противостоять некоторой части этого момента, представленного в виде пары сил.

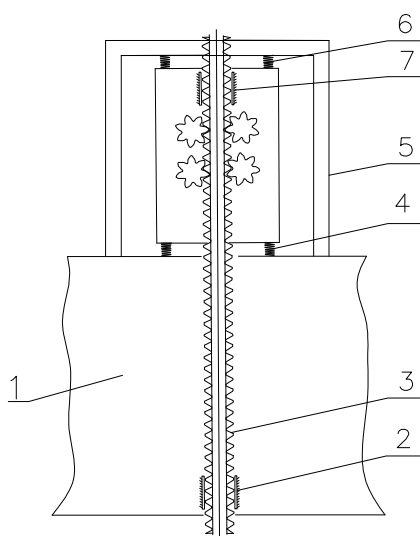


Рисунок 3 – Подвижно закрепленная система подъема
1 – корпус самоподъёмной плавучей буровой
установки (СПБУ); 2 – нижняя направляющая;
3 – хорда опоры; 4 – нижние амортизаторы; 5 – портал;
6 – верхние амортизаторы; 7 – верхняя направляющая

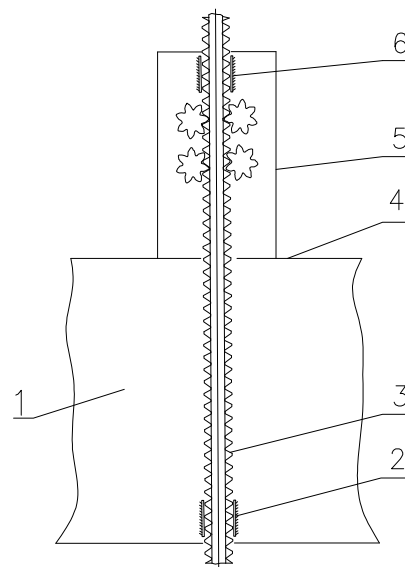


Рисунок 4 – Жестко закрепленная система подъема
1 – корпус самоподъёмной плавучей буровой
установки (СПБУ); 2 – нижняя направляющая;
3 – хорда опоры; 4 – сварное соединение;
5 – портал; 6 – верхняя направляющая

При использовании резинометаллических амортизаторов, которые могут обеспечивать деформацию несколько сантиметров, подъёмные устройства (шестерни) будут реагировать только на вертикальную нагрузку, передающуюся от корпуса, в то время как направляющие противостоят всей силе, возникающей вследствие момента и порыва ветра. Таким образом, значительные нагрузки должны восприниматься поперечными связями, которые расположены в пределах участка между направляющими и, кроме того, хорды подвергаются большим изгибающим напряжениям, когда направляющие находятся посередине пролёта между поперечными связями опор.

Подъёмные устройства, неподвижно прикрепленные к корпусу (рисунок 4), будут иметь тенденцию непосредственно поглощать почти все осевые нагрузки хорд, включая пару сил, которая противостоит опрокидывающему моменту. Вследствие деформации кручения зубчатой передачи (которая мала) и жесткости поперечной связи (которая мала по сравнению с жесткостью хорд) будет иметь место частичная передача опрокидывающего момента как горизонтальной пары сил на направляющие. Однако так как подъёмные устройства будут поглощать почти все нагрузки, возникающие вследствие опрокидывающего момента и веса корпуса, то количество шестерен для статического удержания (с комплектом тормозов) обычно в два раза больше, чем для обычного подъема [3].

Для исследования влияния жесткости элементов опорно-подъёмного устройства (ОПУ) на перераспределение нагрузок рассмотрены несколько различных значений жесткости существующих систем подъёма. Поскольку жесткость обратно пропорциональна перемещениям, для дальнейших исследований рассмотрены прогибы трёх, близких по назначению, устройств и конструкций самоподъёмных плавучих буровых установок (СПБУ).

Численные значения приведенных прогибов элементов опорно-подъёмного устройства (ОПУ) (резинометаллических амортизаторов; металлоконструкции портала, зубчатой рейки и траверсы; валы и зубчатые передачи редуктора) под нагрузкой 1000 кН составили для самоподъёмной плавучей буровой установки (СПБУ): “Мурманская” – 4,6 мм, “Арктическая” – 2,1 мм, “Super M2” – 0,5 мм. Величины прогибов элементов опорно-подъёмного устройства (ОПУ) определяются несколькими способами. Прогибы резинометаллических амортизаторов взяты из технических характеристик. Прогибы металлоконструкций портала, зубчатой рейки и траверсы определены по методу конечных элементов с помощью программного обеспечения [4].

Первый вариант с наименьшей жесткостью характеризуется наибольшими прогибами для конструкций самоподъёмной плавучей буровой установки “Мурманская”. На самоподъёмную плавучую буровую установку применено опорно-подъёмное устройство с переставной рейкой и подвижной траверсой, которые увеличивают суммарный прогиб за счет собственной податливости. Кроме того, в данной конструкции применены амортизаторы со значительной податливостью.

Второй вариант опорно-подъёмного устройства с умеренной жесткостью характеризуется средними прогибами для конструкции самоподъёмной плавучей буровой установки “Арктическая”. Опорно-подъёмное устройство установки предусматривает реечно-шестеренчатый механизм непрерывного действия (рейка двухсторонняя, сплошная является частью металлоконструкции опоры). У такой конструкции по отношению к приведенным вариантам суммарный прогиб будет давать среднее значение, так как отсутствует переставная податливая рейка и подвижная траверса, а амортизаторы имеют уменьшенную податливость.

Третий вариант с наибольшей жесткостью имеет наименьшие прогибы для конструкции самоподъёмной плавучей буровой установки “Super-M2”. Конструкции опорно-подъёмного устройства представляет собой жестко закрепленную систему подъема и не предусматривает амортизирующих устройств, редукторы закрепляются жестко на портале. Суммарный прогиб данной системы подъема наименьший из трех вариантов.

Так как исследование выполняется на базе самоподъёмной плавучей буровой установки “Арктическая”, указанные характерные варианты жесткости опорно-подъёмного устройства рассматриваются применительно к ее конструкции. Для моделирования взаимодействия опоры с элементами закрепления (шестерни редукторов механизма подъема) в модель вводятся упругие стержневые элементы, имитирующие суммарную жесткость системы. Площадь сечений этих элементов выбрана таким образом, чтобы при действующих нагрузках их прогиб соответствовал прогибу фактических элементов опорно-подъёмного устройства. Упругие стержневые элементы моделируют вертикальные и горизонтальные связи опоры с корпусом. В таблице 1 приведено сравнение результатов расчетов усилий в рейках и направляющих в наиболее напряженных точках. Горизонтальные нагрузки приведены как суммарные по осям X и Y.

Из таблицы 1 видно, что с увеличением жесткости системы подъема увеличиваются вертикальные усилия в рейках, а горизонтальные усилия в направляющих уменьшаются, то есть происходит перераспределение усилий в сторону возрастания момента вертикальных сил. По результатам расчета

для сравнения построены графики зависимости горизонтальных и вертикальных усилий от суммарных прогибов системы (рисунок 5-7).

Таблица 1 – Сводная таблица усилий, кН

СПБУ	«Мурманская»	«Арктическая»	«Super M2»
Горизонтальные усилия в верхней направляющей (портал)	1406	1168	6874
	5247	4359	2564
	3841	3190	1877
Горизонтальные усилия в нижней направляющей (понтон)	1955	1717	1236
	7294	6406	4611
	5339	4689	3376
Вертикальные усилия в рейках	-2009	2109	-2312
	-1363	-9880	-2292
	-2245	-2520	-3075

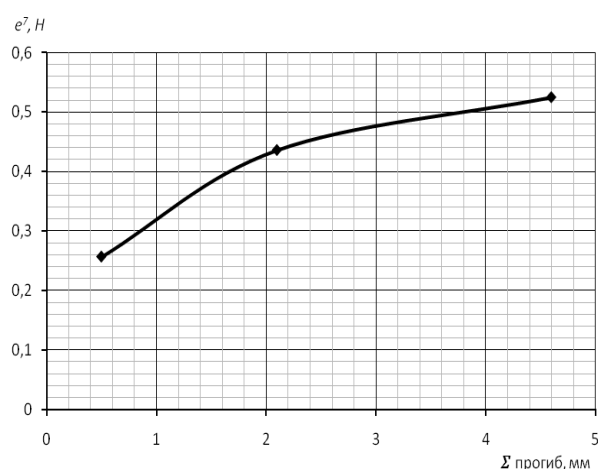


Рисунок 5 – График зависимости горизонтальных усилий верхних направляющих (портал) от суммарных прогибов

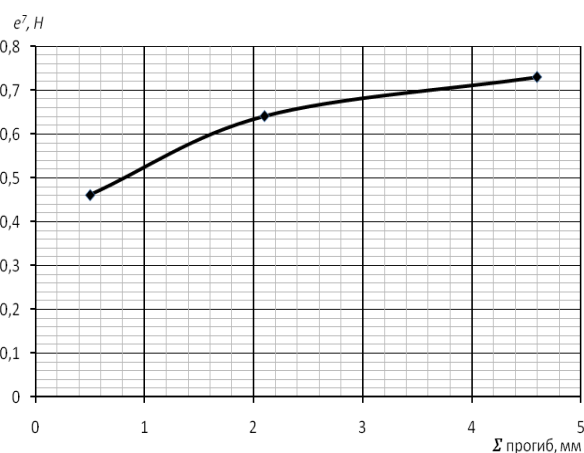


Рисунок 6 – График зависимости горизонтальных усилий нижних направляющих (понтон) от суммарных прогибов

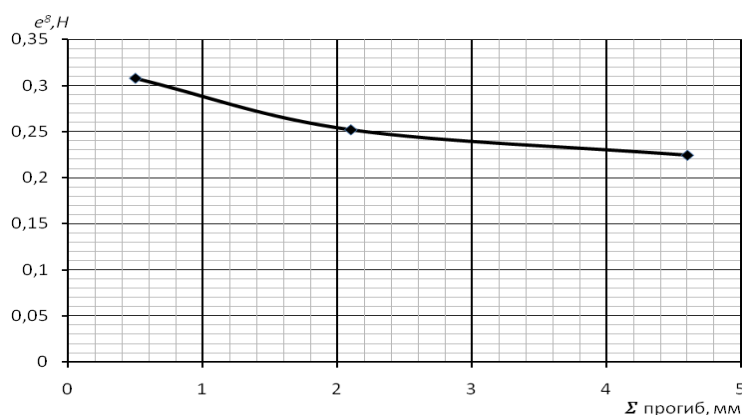


Рисунок 7 – График зависимости вертикальных усилий в рейке от суммарных прогибов

Размерность: $e^7 = 10^7 \text{ Н} = 10^7 * 10^{-3} = 10^4 \text{ кН}$

Таким образом, чем большей жесткостью обладает система, тем большая доля нагрузки воспринимается реечной передачей, и тем меньшую нагрузку принимает портал и корпус в районе направляющих. Критический участок опоры с точки зрения прочности расположен в районе нижней направляющей. Усилия по трем вариантам прикладываются к модели опоры. Как показали расчеты, напряжения в опоре значительно снижаются с увеличением жесткости системы подъема. Сравнение результатов приведено в таблице 2 и показывает, что увеличение жесткости системы подъема

благоприятно сказывается на запасе прочности опоры, что позволяет увеличить нагрузки на нее или минимизировать вес металлоконструкций опоры. В то же время растут вертикальные усилия в зубчатом зацеплении, что требует применения более прочных материалов для реек и шестерен, а также редукторов механизма подъема.

Таблица 2 – Сводная таблица напряжений, МПа

СПБУ	«Мурманская»	«Арктическая»	«Super M2»
Действующие напряжения	459	400	363

Следовательно, при проектировании самоподъемной плавучей буровой установки (СПБУ) необходимо определить приоритетные узлы, нагрузки на которые желательно уменьшить с целью обеспечения больших запасов прочности либо уменьшения металлоемкости и трудоемкости изготовления узла. Исходя из этого, назначается требуемая податливость амортизатора. Полученные результаты исследования можно использовать в процессе проектирования новых установок для оптимизации характеристик и конструкции опорно-подъемного устройства (ОПУ).

Бibliографический список использованной литературы

1. Морские инженерные сооружения. Ч.1. Морские буровые установки: учеб. / Р.Б. Борисов, В.Г. Макаров, В.В. Макаров [и др.]. — СПб.: Судостроение, 2003. — С. 535.
2. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. — СПб.: Российский морской регистр, 2006. — С. 460.
3. Boswell L.F. The Jack-up Drilling Platform. Design and Operation / L.F. Boswell // Department of Civil Engineering, The City University. — London, 1986. — P. 171–226.
4. ANSYS 12 Training Manual (2009)

Поступила в редакцию 11.03.2011 г.

Ігнатів В.С., Вакеріна В.В., Абрамян К.В.. Дослідження розподілу зусиль у вузлах міцності опорно-підйомних пристроїв самопідйомних плавучих бурових установок

Досліджується міцність основних вузлів опорно-підйомного пристрою самопідйомних плавучих установок під час дії максимальних зовнішніх сил, що діють у режимі штормового відстою і в залежності від їх жорсткості.

Ключові слова: самопідйомна плавуча бурова установка (СПБУ), опорно-підйомний пристрій, опора, рейка, жорсткість, напруга.

Ignatovich V.S., Vakerina V.V., Abramyan K.V. The distribution investigation for the efforts at the sites of strength of support and lifting devices of jack-up drilling rigs

The strength of the basic units of support-lifting devices of jack-up drilling rigs under the action of the maximum external forces acting in the mode of storm sediment is researched.

Keywords: jack-up, muscle-lifting device, support, rake, stiffness, tension.