

УДК 629.124.74:622.242

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

А.В. Кузьмина, М.Г. Балашов

Севастопольский национальный технический университет

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

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНЫХ КОЛОНН СПБУ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ЗАКРЕПЛЕНИИ В КОРПУСЕ

На основе результатов расчета конечно-элементной модели опорных колонн СПБУ анализируется влияние степени закрепления их в корпусе на напряженное состояние элементов опорно-подъемного устройства.

Для СПБУ характерны два основных режима эксплуатации.

1. В транспортном положении на плаву опорные колонны (опоры) подняты и их масса и моменты от сил инерции, возникающие от качки при плавании на волнении, передаются через элементы опорно-подъемного устройства (ОПУ) на корпус.

2. Режим стоянки на точке бурения при различных погодных условиях, включая жестокий шторм. В этом положении корпус (понтон) поднят над водой на такую высоту, чтобы максимальные волны не ударяли в его днище. Масса корпуса и моменты от внешних нагрузок (ветер, волны, течение) через элементы ОПУ передаются на рейки (стойки) опорных колонн, при этом жесткость установки зависит от степени закрепления колонн в корпусе.

В традиционных конструкциях СПБУ взаимодействие между колонной и корпусом осуществляется во всех режимах эксплуатации при наличии постоянных зазоров между соприкасающимися элементами ОПУ и колонн, что обеспечивает свободное перемещение опор относительно корпуса. Наличие зазоров между опорами и корпусом приводит к горизонтальным смещениям опоры в районе направляющих понтон и портала и вертикальному скольжению стоек и реек опор, что вызывает износ листов направляющих, циклические и ударные нагрузки на элементы ОПУ.

При проектировании новых СПБУ одним из ключевых решений по повышению надежности является внедрение устройств закрепления (фиксации) опор, обеспечивающих жесткое соединение между опорами и корпусом. С использованием устройств закрепления опор могут быть решены (в режимах стоянки на точке и транспортировки) проблемы усталостной прочности за счет снижения касательных напряжений и динамических нагрузок в районе направляющих понтон и портале, а также уменьшения отклонений от исходного положения за счет увеличения жесткости системы.

Целью статьи является расчет прочности опорных колонн и элементов ОПУ, а также анализ действующих напряжений в режимах транспортировки и стоянки на точке в экстремальных условиях при наличии устройства закрепления и без него.

Общая жесткость системы в большинстве случаев оказывается очень важным фактором влияния на динамические характеристики сооружения. Применение устройства фиксации опор в корпусе СПБУ позволяет повысить жесткость опор, не повышая при этом их веса, а также уменьшить размеры их связей, и тем самым снизить гидродинамические нагрузки, являющимся основным расчетным параметром при проектировании.

В настоящей статье рассматриваются результаты исследования напряженного состояния в опорных колоннах трехопорной СПБУ 6500 /100 для эксплуатации в арктических условиях (рисунок 1 а, б).

Основные характеристики: длина корпуса составляет 88,0 м; ширина – 66,0 м; высота борта – 9,7 м; глубина бурения до 6500 м при глубине моря от 7 до 100 м.

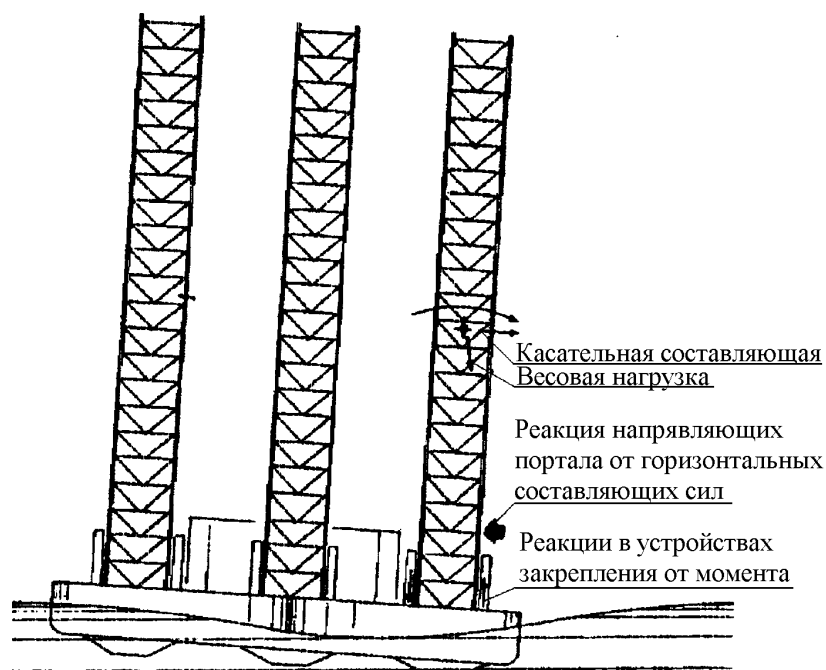
Условия эксплуатации: высота волны (обеспеченность 1%) 15 м при глубине воды 100 м; 18 м при глубине воды 80 м; скорость ветра – 45 м/с при глубине воды 100 м.

ОПУ состоит из трех опор, каждая с механизмом подъема непрерывного действия с электро-механическим приводом, реечно-шестеренчатым механизмом подъема с непрерывной рейкой по всей длине опоры. Тип опор – трехгранные, ферменной конструкции, с расстояниями между осями стоек 10 м; длина опор 139 м. Стойки опоры коробчатого сечения, выполнены из стали АБ – 1 (F500Z) и соединены между собой раскосами из труб $\varnothing 325 \times 22$ и $\varnothing 245 \times 16$. Наружной стороной коробчатой стойки является зубчатая рейка, взаимодействующая с выходящими шестернями редуктора механизма подъема. Опора проходит сквозь направляющие, расположенные в шахте портала и понтон. К нижней части опоры жестко крепится башмак диаметром 14 м и высотой 1,82 м.

Портал механизма подъема представляет собой конструкцию, состоящую из стоек и балок коробчатого сечения. Стойки портала приварены к фундаментам на верхней палубе понтон.

При расчетах ОПУ рассмотрены варианты без устройства закрепления и с устройством закрепления опор в корпусе.

а)



б)

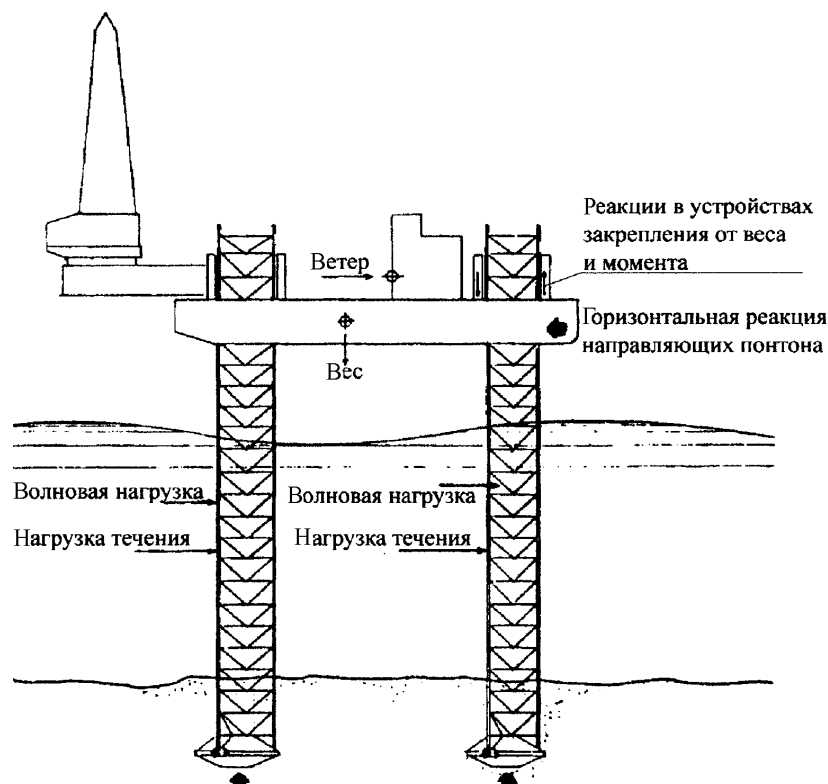


Рисунок 1 – Трехопорная СПБУ 6500/100: а) транспортировка СПБУ (с устройствами закрепления опор); б) режим штормового отстоя

Для определения напряжений в опорной колонне и усилий, воспринимаемых элементами ОПУ, понтона и портала, в режимах транспортировки и штормового отстоя, была исследована трехмерная модель колонны СПБУ в стержневой идеализации для расчета на ЭВМ. Модель изображена на рисунке 2.

Расчет выполнен при помощи программного комплекса ANSYS 9, разработанного компанией ANSYS Inc. и основанного на применении метода конечных элементов. В связи с особенностями нагрузок, действующих на стойки и раскосы опорной колонны (совместное действие осевых сжимающих и растягивающих усилий, а также перерезывающих сил), для создания расчетной модели колонны

выбран стержневой конечный элемент, свойства которого основаны на теории стержней С.П. Тимошенко. В соответствии с этой теорией поперечные деформации сдвига остаются постоянными по всей площади поперечного сечения. Учет сдвиговых деформаций стержня при указанной нагрузке является необходимым условием. Кроме того, принятый конечный элемент учитывает возможные внеплоскостные деформации от кручения (эффект деформации).

В расчетную модель введены элементы, учитывающие податливость портала в горизонтальном направлении (введен один элемент с площадью сечения $4,83 \times 10^{-4} \text{ м}^2$). Учтены жесткость амортизаторов и податливость портала в вертикальном направлении (введены 12 элементов с площадью сечения $3,46 \times 10^{-4} \text{ м}^2$ каждый).

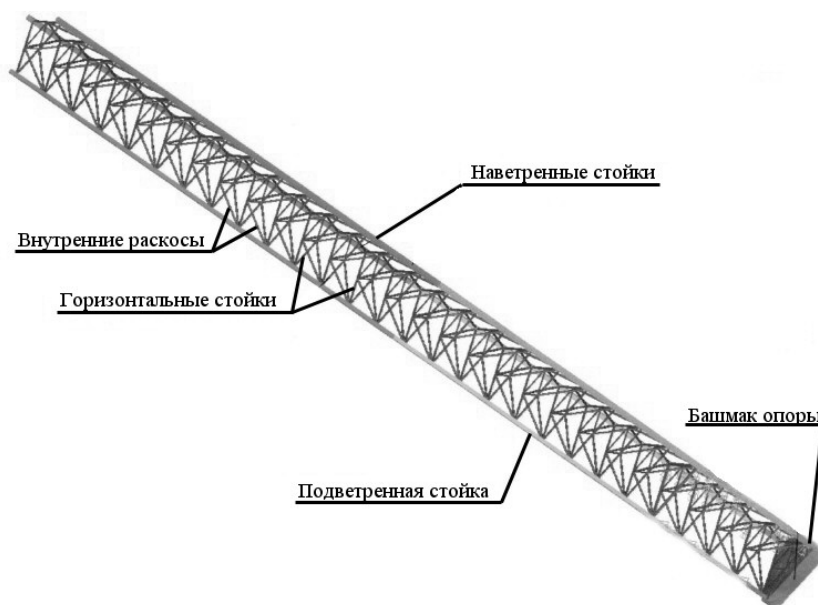


Рисунок 2 – Трехмерная модель колонны СПБУ

База восприятия горизонтальных нагрузок винтами портала и направляющими понтона принята 19,9 м.

Металлоконструкции опоры выполнены: горизонтальные стойки и раскосы из стали категории E40 с пределом текучести $R_{\text{ЕН}} = 390 \text{ МПа}$; вертикальные стойки из стали АБ2 (F500Z) с $R_{\text{ЕН}} = 490 \text{ МПа}$; зубчатая рейка из стали АБ2 (F690) с $R_{\text{ЕН}} = 690 \text{ МПа}$; коэффициент безопасности для материалов опоры принят $\eta = 0,6$.

Режим транспортировки СПБУ с поднятыми опорами является критическим, как для конструкции самих опор, так и для элементов ОПУ и поддерживающих конструкций. Особого внимания заслуживает рассмотрение влияния закрепления подъемного устройства (жесткого или на амортизаторах). За счет просадки амортизаторов максимальные нагрузки на опору могут быть снижены путем частичного поглощения энергии. Амортизаторы являются дополнительными пружинами в общей системе жесткости, что позволяет уменьшить отношение вертикальной пары сил (момент воспринимаемый осевыми усилиями в стойках) к горизонтальной паре сил (момент и срезающие усилия от внешних нагрузок, воспринимаемые раскосами). Типовое отношение вертикальной к горизонтальной составляющей нагрузки для жесткой и амортизированной системы составляет, примерно 2,53/1 и 1,23/1 соответственно.

Устройства закрепления опор в сочетании с шестернями высокой жесткости позволяют увеличить отношение вертикальной к горизонтальной составляющей нагрузки до 46/1 [2], что приводит к более эффективной конструкции опор. Устройства, способные обеспечить плотное схватывание и удержание опор, которые не позволяют опоре совершать перемещения в районе подъемного механизма, еще более повышают эффективность конструкции за счет полного исключения либо значительного уменьшения ударных нагрузок, что требуется многими классификационными обществами.

Выбор конструкции опор, размеров и типов сечений связей является крайне важными с точки зрения способности СПБУ осуществлять транспортировку с максимально поднятыми опорами. Эффективной считается конструкция опоры, для которой отношение веса стоек к весу раскосов является большим 1. Это отношение определяется схемой расположения раскосов опоры, а также отношением вертикальной к горизонтальной составляющей нагрузки на несущие конструкции, вертикальных и горизонтальных реакций в шестернях ОПУ и направляющих в понтоне и портале, а также напряжений в элементах конструкций опорной колонны (рисунок 3).

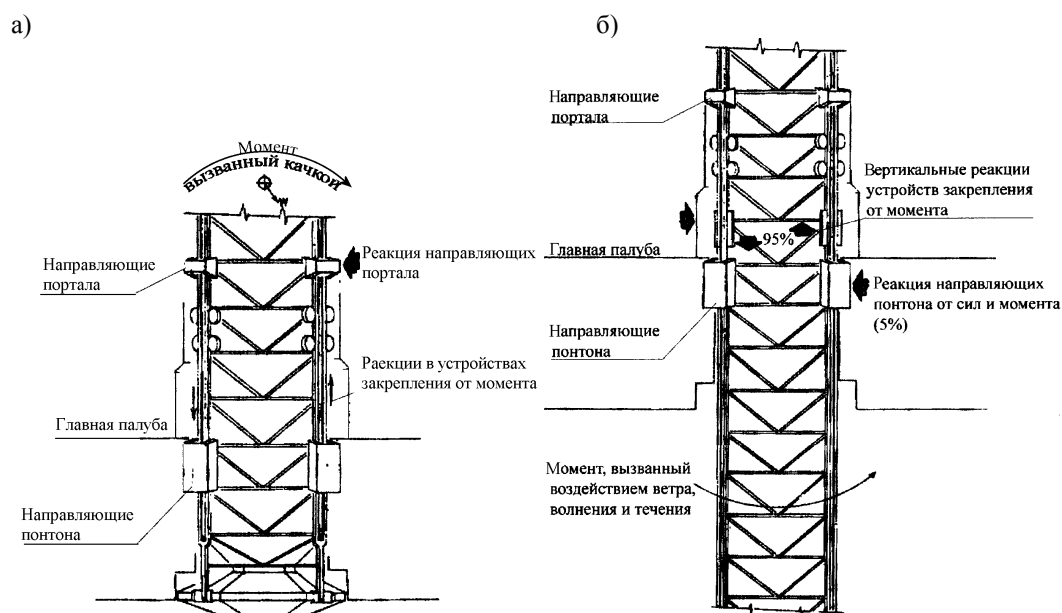


Рисунок 3 – Режим транспортировки на плаву (с устройствами закрепления опор):
а) воспринимающие нагрузку элементы при транспортировке; б) распределение нагрузок

Исходные данные: высота волны $h_B = 6,0$ м; амплитуда килевой качки $\psi_{3\%} = 6,5$; $\psi_{1\%} = 7,48$; период килевой качки $\tau_\psi = 11,2$ с; амплитуда вертикальной качки $\xi_{3\%} = 1,6$ м; $\xi_{1\%} = 1,84$ м; период вертикальной качки $\tau_\xi = 11,3$ с. Ветровая нагрузка $P_w = 710$ кН; весовая нагрузка $G_x = 1529$ кН; $G_z = 11771$ кН; инерционная нагрузка $F_x = 1623$ кН; $F_z = 2856$ кН.

С учетом указанных условий для созданной расчетной модели был выполнен расчет без закреплений, учитывающих фиксирующие устройства, и с таковыми. В таблице 1 приведены полученные значения.

Режим штормового отстоя (экстремальный режим) может стать определяющим при выборе размеров элементов опор и опорного механизма. На способность СПБУ противостоять шторму, наряду с их характеристиками (тип зубчатой рейки, наличие амортизаторов механизма подъема, конструкция опоры) могут значительно повлиять и устройства закрепления (фиксации) опор, показанные на рисунке 4.

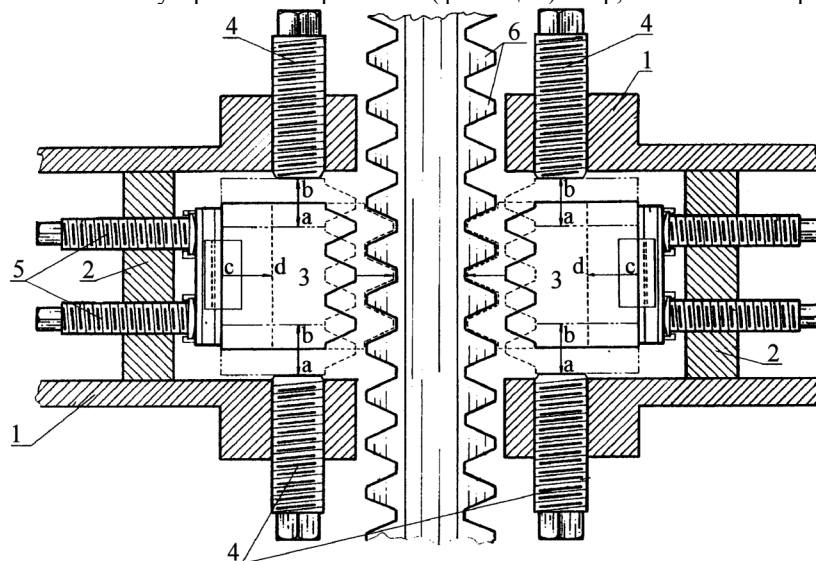


Рисунок 4 – Устройство закрепления (фиксации) опор: 1 и 2 – смежные корпусные конструкции;
3 – реечный элемент устройства закрепления; 4 и 5 – винты регулировки положения рейки устройства;
6 – зубья рейки стойки; а и б – крайние вертикальные положения рейки устройства;
с и д – крайние горизонтальные положения рейки устройства

Применение устройств закрепления, способных входить в плотный контакт с рейками опор, приводит к значительному снижению горизонтальной составляющей реакции от приложенной нагрузки, отношение вертикальной и горизонтальной составляющей 95 % и 5 % соответственно. При отсутствии устройства закрепления это отношение варьируется от 83 % и 17 % для жестко закрепленного подъемного механизма, до 45 % и 55 % для системы с амортизаторами в предположении, что внешние условия и гидродинамические характеристики элементов конструкции остаются неизменными.

Расположение направляющих понтона и портала, а также конструктивных зазоров между ними и опорой также являются важными конструктивными параметрами. Направляющие, осуществляющие более плотный контакт с элементами опоры, будут применяться там, где необходимо воспринимать основную часть динамической нагрузки в виде горизонтальной составляющей. При жестко закрепленном механизме подъема, когда основная часть нагрузки передается осевыми усилиями, желательно иметь достаточные зазоры, чтобы вообще исключить контакты стоек опор с направляющими при шторме.

Для расчета в режиме штормового отстоя в модель были введены соответствующие закрепления для амортизаторов механизма подъема, направляющих понтона и портала.

Исходные данные: глубина стоянки 100 м; действующие нагрузки в экстремальном режиме: горизонтальная – 1696 кН; вертикальная – 53287 кН; изгибающий момент, приведенный к срезу опоры (в районе соединения с башмаком), – 64810 кН·м; коэффициент безопасности для материала опоры $\eta = 0,84$.

С учетом приведенных данных и условий выполнены расчеты модели без закреплений и при наличии фиксирующих устройств. В таблицах 1 и 2 приведено сравнение результатов расчета для различных элементов конструкции в транспортном и экстремальном режимах.

Применение устройства закрепления опор связано, в первую очередь, с режимом транспортировки, при котором усилия, их направления, величина и распределение менее предсказуемы, чем для штормового режима. Главная особенность этих усилий – динамичность их воздействия, вызванная качкой установки. Расчет параметров волнения в большей степени зависит от метода и выбранной степени приближения.

Таблица 1 – Максимальные результирующие значения для различных элементов опорно-подъемного устройства СПБУ. Режим транспортировки

Параметр	Элемент конструкции	Значение без устройств закрепления	Значение с устройствами закрепления	Допускаемые напряжения	Процент снижения
Вертикальная реакция, кН	Шестерни механизма подъема	7360,5	2158,5	7848,0	70,7
Горизонтальная реакция, кН	Направляющие портала	9492,2	2398,8		74,7
	Направляющие понтона	2290,0	0,0		100,0
Действующие напряжения в районе шестерен, МПа	Горизонтальные стойки	89,4	41,1	234,0	54,0
	Диагональные раскосы	101,4	48,9		51,7
Действующие напряжения в районе направляющих портала, МПа	Горизонтальные стойки	165,5	16,0		90,4
	Диагональные раскосы	102,4	92,4		9,8

Таблица 2 – Максимальные результирующие значения для различных элементов опорно-подъемного устройства СПБУ. Режим штормового отстоя (экстремальный)

Параметр	Элемент конструкции	Значение без устройств закрепления	Значение с устройствами закрепления	Допускаемые напряжения	Процент снижения
Вертикальная реакция, кН	Шестерни механизма подъема	5657,8	19,4	7848,0	99,7
Горизонтальная реакция, кН	Направляющие портала	3884,9	1505,9		61,2
	Направляющие понтона	6073,9	119,7		98,0
Действующие напряжения в районе шестерен, МПа	Горизонтальные стойки	275,0	4,2	328	98,5
	Диагональные раскосы	220,4	6,6		97,0
Действующие	Горизонтальные	204,5	98,8		51,7

напряжения в районе направляющих портала, МПа	стойки			
	Диагональные раскосы	191,1	12,6	93,4

Из таблицы 1 видно, что максимальные усилия на две шестерни верхнего яруса составило 7360,5 кН или 376 т на один зуб при предельно допустимой нагрузке 400 т. Таким образом, при каждом цикле нагрузок на шестеренки будет действовать почти максимально допустимая нагрузка.

Следует отметить, что наибольший процент аварий СПБУ связан именно с повреждением или разрушением несущих элементов при транспортировке на плавку. Это вызывается значительными по величине динамическими нагрузками и часто является следствием неудовлетворительных расчетов усталостной долговечности ответственных элементов. В связи с этим полученное снижение максимальной нагрузки на шестерню с 376 т до 110 т подчеркивает особое значение применения устройств опор. Кроме того, надежное закрепление стоек опоры исключает относительные перемещения ее внутри корпуса СПБУ, снижая тем самым динамичность действующих нагрузок на элементы подъемного механизма. Такое снижение нагрузок и коэффициента динамичности позволяет допустить транспортировку СПБУ на плавку при более суровых условиях (при волнах 1 % обеспеченности), что позволяет не только увеличить усталостную долговечность, но, что крайне важно, исключить возникновение трещин и разрушение критических элементов.

Из таблиц 1 и 2 видно, что нагрузка на опорную поверхность направляющих портала в режиме транспортировки снизилась более чем в 3 раза, а для экстремального режима на направляющие понтона более чем в 2 раза. При этом удалось практически полностью снять нагрузки с направляющих понтона и портала.

Нагрузки на направляющие портала в режиме транспортировки заслуживают особого внимания. При наличии даже небольших зазоров между опорными поверхностями и стенкой стойки опоры динамические нагрузки на эти поверхности могут достигать и превышать допустимые значения. Воспринятые направляющими нагрузки передаются на стойку опоры и раскосы, вызывая в них напряжения осевые и изгиба. Раскосы вследствие длительного динамического воздействия нагрузок значительной величины могут деформироваться и терять способность выдерживать допускаемые напряжения.

Таким образом, применение устройства закрепления опор позволяет существенно снизить износ опорных поверхностей, а за счет ограничения внутри корпуса – исключить деформации и повреждения этих поверхностей и заклинивание опор в этом районе, а также снимает дополнительные значительные по величине напряжения в соприкасающихся участках стоек и примыкающих к ним раскосов (более чем в 2 раза).

В заключении следует отметить положительный эффект от применения устройств закрепления (фиксации) опорных колонн. Указанные устройства могут быть предусмотрены не только для вновь строящихся СПБУ. Также существует возможность оборудования ими эксплуатируемых установок, если конструкция последних позволяет размещение таких устройств в корпусе или портале.

Для повышения надежности СПБУ в условиях эксплуатации в дальнейшем следует обратить внимание на разработку методов расчета нагрузок с учетом их динамического воздействия в наиболее аварийно-опасном режиме транспортировки СПБУ на плавку.

Задачами дальнейших исследований путей повышения надежности СПБУ в экстремальных условиях являются разработки и практическое использование методов расчета напряженного состояния с учетом динамического воздействия нагрузок.

Авторы, пользуясь представившейся возможностью, выражают признательность компании ANSYS Inc. за возможность проведения исключительно научных исследований с использованием универсального программного комплекса ANSYS.

Библиографический список

1. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок (ПБУ) и морских стационарных платформ (МСП). — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2006. — 366 с.
2. Evaluation of Motions Responses and Forces in Transit, by Jui Fank-Kuo, Det Norske Veritas. Presented at Dynamic Analysis and Fatigue of Jack-Up Drilling Units Seminar, 1994. — P. 42–48.
3. Jack-up rig with improved rack chock assembly, United States Patent 5,622,452; Apr. 22, 1997, Jerome L. Goldman. — 6 p.
4. The Jack-up Drilling Platform. Design and Operation / edited by L.F. Boswell, Department of Civil Engineering, The City University, London, 1986. — P. 56–65.

Поступила в редакцию 21.01.2008 г.