

УДК 629.124.74:622.242

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

А.В. Кузьмина, ст. преп.

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПЛАВУЧИХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК – НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

На основе анализа режимов эксплуатации самоподъемных плавучих буровых установок предлагается системный подход к изучению прочности, надежности и экологической безопасности с выявлением слабых элементов в конструкциях и предотвращением их разрушения.

В настоящее время на континентальном шельфе морей и океанов эксплуатируются плавучие буровые установки (ПБУ) и морские стационарные платформы (МСП). Разведка и добыча нефти и газа на больших глубинах сопровождается ужесточением требований к прочности конструкций, охране окружающей среды, повышению экологической безопасности.

Современные ПБУ и МСП представляют собой сложные сооружения с мощными энергетическими установками, технологическими комплексами, которые в процессе работы приводят к образованию различных видов отходов. С увеличением глубины возрастают нагрузки, действующие как на сооружение в целом, так и на его конструктивные элементы, что повышает вероятность возникновения аварийных ситуаций, а следовательно, и реальной опасности загрязнения окружающей среды. Это подтверждается большим числом аварий с повреждением и гибелью сооружений в различных бассейнах и при различных режимах эксплуатации.

По зарубежным материалам в период с 1970 по 1982 г.г. произошло 560 аварий, из которых 17 % – по погодным условиям и 10 % связаны с разрушением конструкций. С 1980 по 1987 г.г. установлено 1136 случаев аварий на технических средствах для разведки и добычи нефти, из них 50 % на мобильных установках, в том числе 44 % аварий связано с транспортировкой сооружений, а 56 % – с бурением скважин. Анализ показывает, что больше всего аварий (около 60 %) происходит на СПБУ; они являются самыми аварийными и очень уязвимыми во время буксировки, когда происходит наибольшее количество аварий. Полупогружные установки получают повреждения чаще всего во время штормов.

По данным статистики к числу причин аварий ПБУ относятся следующие:

- недостаточное качество проектирования (неполный учет действующих нагрузок при всех режимах эксплуатации, неправильный выбор категории стали для основных конструкций, наличие концентраторов в зоне действия высоких напряжений, нерациональное конструктивное решение ответственных узлов и др.);
- неудовлетворительные технологии изготовления и качество монтажа конструкций, особенно на открытых площадках и на плаву;
- некачественное выполнение сварки, особенно толстостенных конструкций опорных колонн и других ответственных узлов корпуса;
- расслоение листов большой толщины при действии нагрузки в поперечном направлении и сварке в стесненных условиях.

Цель статьи заключается в определении метода анализа причин аварий на морских сооружениях для добычи нефти и газа, учитывающего влияние основных силовых и эксплуатационных факторов и позволяющего выявить слабые места в конструкциях, воздействуя на которые можно повысить надежность сооружения и его экологическую безопасность при эксплуатации.

В качестве такого метода целесообразно применить системный подход, при котором сложное инженерное сооружение (ПБУ, судно) рассматриваются как многоуровневая система, каждый уровень которой включает конструкции, оборудование или системы одного функционального назначения. В свою очередь, уровень системы, как структурная единица, может быть разбит на подуровни, узлы, детали. Укрупненная схема такой системы показана на рисунке 1.

Изучая и анализируя каждую структурную единицу, входящую в рассматриваемый подуровень, можно оценить влияние конкретного узла конструкции на прочность сооружения или оборудования на тот или иной фактор воздействия на гидросферу, атмосферу или животный мир. Каждый из выделенных уровней системы несет определенную степень ответственности не только за экологическую безопасность, но и за безопасность работы и существования сооружения как объекта в целом, так как нарушение прочности и целостности сооружения может привести к экологической катастрофе. Примером может служить разрушение или серьезное повреждение корпуса танкера, в результате чего происходит разливание нефти, приводящее к экологической катастрофе на больших участках акватории и

её берегов. Из показанных на рисунке 1 уровней наиболее глубоко изучены (как источники загрязнения окружающей среды) структурные единицы, входящие в состав энергетического и технологического комплексов.

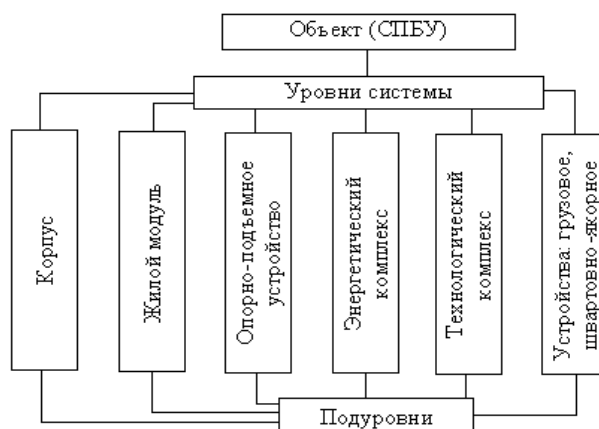


Рисунок 1 – Схема разбивки объекта СПБУ на функциональные уровни и подуровни

Наибольший интерес с точки зрения надежности и прочности сооружений (СПБУ) в целом, а значит и его экологической безопасности представляет опорно-подъемное устройство (ОПУ). Разбивка опорно-подъемного устройства на структурные единицы приведена на рисунке 2. При анализе ОПУ следует учитывать, что корпус и конструкция опоры должны удовлетворять требованиям Правил Регистра [1], вытекающим из классификации всех конструкций на основные, специальные и вспомогательные. При таком подходе можно выделить элементы и узлы, разрушение которых происходит при эксплуатации в результате одновременного воздействия неблагоприятных факторов (величина, характер и направление опасных нагрузок; несоответствие свойств материала условиям эксплуатации металлоконструкции; несоблюдение режима работы конструкции) и может привести к тяжелым последствиям для всего сооружения и окружающей среды. Кроме того, учет указанных факторов может помочь определить наиболее опасные случаи работы элементов конструкции сооружения, непредусмотренные основными методами расчета. К таким конструкциям ОПУ относятся рейки опор, повреждение которых может привести к гибели сооружения.

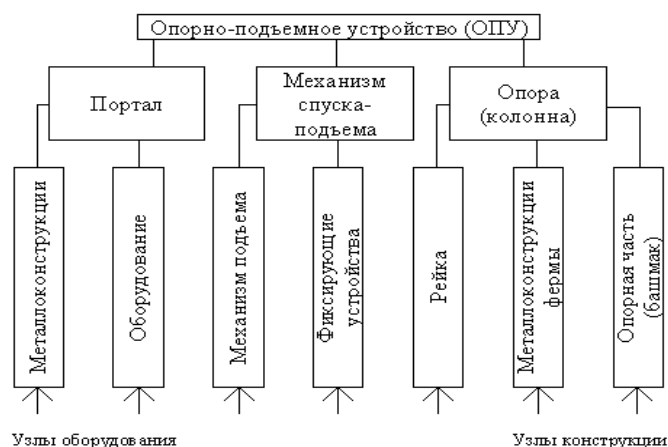


Рисунок 2 – Схема разбивки на структурно-функциональные единицы

В соответствии с Правилами Регистра опора относится к специальным конструкциям, она состоит из колонны, представляющей трех- или четырехгранную пространственную ферму, в углах пересечения граней которой вварены рейки, вступающие во взаимодействие с зубчатыми элементами механизма подъема, и опорной части (башмака), опирающейся непосредственно на грунт [2].

Прочность опор СПБУ проверяется в рабочем положении (опирание на грунт) в режиме жестокого шторма и при транспортировке (наплаву) сооружения при ограниченном волнении. Как правило, режим жестокого шторма с обеспеченностью 10^{-6} является расчетным для опоры, при котором нагрузки на сооружение определяются достаточно точно и являются максимальными. Возникающие в узлах соединения опор с корпусом изгибающие моменты передаются в основном через фиксирующие

устройства на зубья реек в виде горизонтальных реакций, воспринимаемых стержнями фермы опоры. Вертикальные реакции на зубья рейки зависят от массы понтона и усилий от опрокидывания СПБУ.

При выполнении условий $\sigma_p < [\sigma]$ и $\tau_z < [\tau]$ обеспечивается общая и местная прочность опоры (σ_p и τ_z – нормальные напряжения в рейке и касательные напряжения в зубьях, $[\sigma]$ и $[\tau]$ – допускаемые напряжения).

Однако статистика показывает, что опоры чаще всего получают повреждения при транспортировке СПБУ, когда они подняты, закреплены фиксирующими устройствами и испытывают воздействие поперечных инерционных нагрузок от качки понтона и давления ветра. На опоры в районе портала действуют горизонтальные усилия от изгибающего момента и вертикальные усилия на зубья рейки от массы колонн.

Буксировка сооружения производится при волнении до 5 баллов и ветре до 7 баллов, однако в процессе перегона условия могут оказаться более жесткими, что вызовет увеличение напряжений и как следствие – повреждение несущих связей опоры от их изгиба. В связи с этим целесообразно определить запас прочности относительно предельного состояния конструкции, при котором можно избежать разрушительных процессов в условиях превышения нормативных режимов перегона СПБУ.

Не менее ответственным при эксплуатации СПБУ является режим снятия установки с точки бурения, когда с помощью ОПУ производится выдергивание опор из грунта. При этой операции на опоры действуют нештатные нагрузки (вертикальная сила и изгибающий момент), создаваемые дополнительными силами плавучести при увеличении осадки и одновременным смещением корпуса СПБУ относительно оси скважины. Последняя вытаскиваемая из грунта опора испытывает наибольший общий изгиб и местные срезающие усилия на зубья рейки. В рассматриваемом случае фиксирующие устройства отключены и изгибающий момент полностью воспринимается парой вертикальных сил, действующих на опорные поверхности зубьев, к которым также приложены вертикальные усилия, создаваемые механизмом подъема. Таким образом, максимально загруженными являются зубья рейки на срез и решетка фермы на сдвиг, при этом касательные напряжения в зубьях могут превышать напряжения в рабочем положении от экстремальных нагрузок.

Поэтому при оценке прочности опор целесообразно кроме обязательных расчетов прочности в рабочем и в транспортном положении провести расчет общей и местной прочности опор для режима снятия СПБУ с точки. В первом приближении можно принять следующую расчетную схему. Нижний конец опоры зашпелен в грунте, а к верхнему концу через зубья рейки передается вертикальная нагрузка механизма подъема и изгибающий момент дополнительных сил поддержания от погружения понтона. При максимально возможной осадке понтона от этих нагрузок определяется изгибающий момент в колонне и касательные напряжения в зубьях рейки. Поскольку нагрузки, действующие при выдергивании опор из грунта, имеют ненормированный характер, и в процессе этой операции могут возникать напряжения, вызывающие разрушение её элементов, для нормирования прочности можно использовать метод предельных состояний

$$\frac{M_{np}}{M_p} \geq n,$$

где M_p – расчетный момент в колонне, $n = 1,25$ – коэффициент запаса.

Предельный момент в опоре равен $M_{np} = \sigma_T \cdot W_m$, где σ_T – предел текучести материала реек, W_m – момент сопротивления сечения опоры с учетом жесткости фермы.

Зубья рейки как при гидравлическом, так и электромеханическом механизме подъема должны

$$\frac{Q_{np}}{Q_p} \geq n$$

рассчитываться на срез от вертикальной нагрузки Q_{np} , где Q_{np} – предельная вертикальная сила, вызывающая в сечении зуба касательные напряжения, равные пределу текучести τ_T ; Q_p – вертикальная нагрузка.

Примером таких повреждений может служить поломка зубьев рейки и расколов опорной колонны СПБУ «Каспий» при выемке опор из грунта в Каспийском море и СПБУ «Таврида» – в Черном море.

Один зуб прямоугольного сечения, состоящий из двух выступов листа толщиной 0,085 м и высотой 0,6 м, был полностью срезан, а притыкающиеся к рейке в этом сечении горизонтальные и наклонные расколы деформированы и разрушены по сварному шву. Реальная картина разрушения рейки совпадает с предлагаемой схемой напряженного состояния опоры при её выдергивании из грунта (рисунок 3). Таким образом, самым слабым элементом в конструкции опоры являются зубья рейки, а наиболее напряженным режимом для них является выдергивание опор из грунта при снятии СПБУ с точки бурения. На разработку и изготовление этих элементов должно быть обращено особое внимание проектанта и изготовителя.

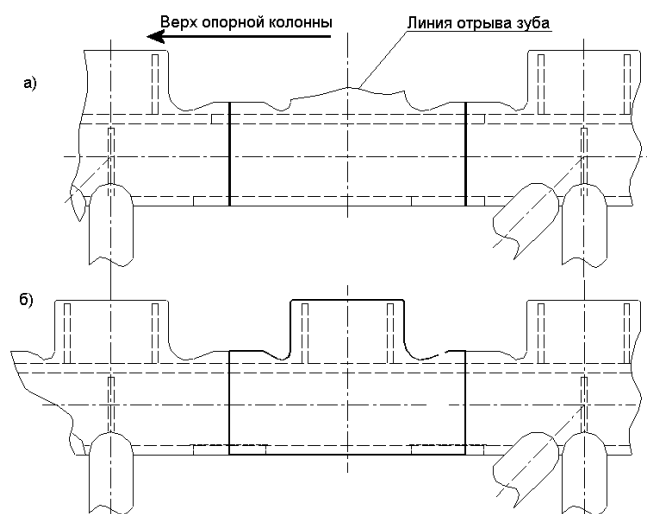


Рисунок 3 – Участок рейки СПБУ «Таврида» до демонтажа (а) аварийного элемента зубчатой рейки и после монтажа (б) нового элемента (зуба)

Использование метода предельных состояний позволяет определить допустимую величину дополнительных сил поддержания и дополнительного погружения понтона при выдергивании колонн, а, следовательно, контролировать при эксплуатации.

Необходимо отметить, что повышение экологической безопасности связано с обеспечением прочности и надежности конструкций СПБУ и МСП. Вопросы надежности таких сложных сооружений должны решаться системно и комплексно на всех стадиях их создания и эксплуатации.

Комплексное выполнение этих требований позволит создавать надежные, экологически безопасные для окружающей среды морские сооружения для разведки и добычи нефти и газа.

На основании предложенного метода предполагается решение задачи о выявлении слабых мест в конструкции полупогружных плавучих буровых установок в условиях жестокого шторма с последующей разработкой мероприятий по повышению надежности.

Библиографический список

1. Правила классификации и постройки морских стационарных и плавучих буровых платформ. — СПб.: Российский Морской Регистр Судоходства, 2001. — 290 с.
2. Морские инженерные сооружения, Ч.1. Морские буровые установки: Учебник / Р.В. Борисов, В.Г. Макаров, В.Ф. Соколов и др.; Под общ. ред. В.Ф. Соколова. — СПб.: Судостроение, 2003. — 535 с.

Поступила в редакцию 14.03.2006 г.