

УДК 624.014:624.047.2

О работе конусной обечайки опорных стоек блоков морских стальных стационарных платформ при ледовом воздействии**А. Ю. Фурсов***Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, г. Симферополь, Россия
e-mail: alexandrpro3@gmail.com*

Аннотация. Перспективы развития Азово-Черноморского региона Российской Федерации связаны, прежде всего, с освоением глубоководной части Черного моря. В общем прогнозные ресурсы углеводородов оцениваются в объеме 1,5–2,4 трлн м³ в газовом эквиваленте. При разработке и проектировании конструкций морских стационарных платформ (МСП) для газового месторождения в Азовском море именно ледовые нагрузки являются основными и определяющими напряженное состояние всей стационарной платформы. Для уменьшения ледового воздействия льда на опорные стойки МСП в местах контакта предложено устанавливать специальные конструкции — конусные ледоразрушающие устройства.

Проведено аналитическое исследование напряженного состояния ледоразрушающих устройств на основе общих положений теории упругости тонких пластинок. Получено выражение, определяющее условие прочности материала конусной обечайки. Для получения конкретных результатов расчетов напряженного состояния ледоразрушающего устройства использован аппарат программного комплекса «Ansys17.2».

Усовершенствование опорной стойки МСП путем установки конусных конструкций, усиленных бетоном в зоне контакта, приводит к разрушению ледового поля от изгиба, а не от сжатия. При этом горизонтальное давление льда на опору снижается. Вследствие этого снижается уровень напряжений в элементах опорной стойки МСП. В модели, усиленной бетоном, за счет трехосного сжатия бетона напряжения уменьшились в 3,7 раза по сравнению с уровнем напряжений в аналогичных элементах базовой модели и в 1,7 раза по сравнению с моделью с металлическими ребрами жесткости.

Деформации элементов в направлении силового ледового воздействия снизились с 4 см в базовой модели до 1 см в усиленной ребрами модели ледоразрушающего устройства, то есть в 4 раза, и до 0,2 см в модели усиленной бетоном, то есть в 20 раз.

Применение композитной конструкции ведет к увеличению жесткости и прочности конструкции для защиты МСП от воздействия льда.

Ключевые слова: морская стационарная платформа; опорная стойка; ледоразрушающее устройство; металлическая оболочка, усиленная бетоном

The operation of the cone shell blocks of offshore structures under ice impact**Alexandr Yu. Fursov***V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia
e-mail: alexandrpro3@gmail.com*

Abstract. The prospects for the development of the Azov-Black sea region of the Russian Federation are primarily related to the development of the deep-water

part of the Black Sea. In general, the forecast hydrocarbon resources are estimated at 1,5–2,4 trillion m³ in gas equivalent. Ice loads are one of the most important factors determining the stress state of the entire stationary platform when developing and designing offshore structures for the gas field in the Sea of Azov. The author of the article proposes to install special structures, such as cone ice-breaking devices, at the contact points.

An analytical study of the stress state of ice-breaking devices is carried out on the basis of the general provisions of the theory of elasticity of thin plates. An expression defining the strength condition of the cone shell material is obtained. The device of the Ansys17.2 software complex was used to obtaining specific results of calculations of the stress state of the ice-breaking device.

Improving the platform support post by installing cone structures reinforced with concrete in the contact zone results in the destruction of the ice field from bending rather than compression. In this case, the horizontal pressure of the ice on the support is reduced. As a result, the stress level in the elements of the offshore structure support post is reduced. Due to the three-axis compression of concrete, the stress decreased in the model reinforced metal shell by 3,7 times compared to the level of stress in similar elements of the base model, and 1,7 times compared to the model with metal stiffeners.

Deformations of elements in the direction of force ice action decreased from 4 cm in the base model to 1 cm in the rib-reinforced model of the ice-breaking device, i.e. by 4 times, and to 0,2 cm in the model reinforced with concrete, i.e. by 20 times.

The use of composite construction leads to an increase in the rigidity and strength of the structure to protect offshore structure from the effects of ice.

Key words: offshore structure; supporting column; ice-breaking device; reinforced metal shell

Введение

Перспективы развития Азово-Черноморского региона Российской Федерации связаны, прежде всего, с освоением глубоководной части Черного моря [1–3], его кайнозойского и докайнозойского разрезов. В общем прогнозные ресурсы углеводородов оцениваются в объеме 1,5–2,4 трлн м³ в газовом эквиваленте [3].

В связи с развитием объемов поисковых и буровых работ в регионе требуется проектирование и строительство морских стационарных платформ (МСП) для глубоководного бурения и освоения скважин. МСП являются главными элементами производства нефтегазодобывающих предприятий, работающих на шельфе [4–8].

МСП представляют собой сложное инженерное сооружение, состоящее из опорного блока, закрепленного к морскому дну (грунту) с помощью трубчатых свай, и верхнего строения, используемого для установки технологического оборудования для добычи и дальнейшей транспортировки нефти и газа (рис. 1).

Значительные ледовые нагрузки являются одним из важнейших факторов, определяющих надежную и эффективную длительную эксплуатацию МСП на морских нефтегазовых месторождениях^{1,2,3}.

¹ СНИП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) [Электронный ресурс]. – Введ. 1984-01-01. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200000256>.

² Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок (ПБУ) и морских стационарных платформ (МСП): по состоянию на 30.06.2008 / Российский Морской Регистр Сухопутного транспорта (РМРС). – НД № 2-020201-008. – СПб., 2008. – 502 с. – (Библиотека официальных изданий).

³ СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. Актуализированная редакция СНИП 2.01.07-85* [Электронный ресурс]. – Введ. 2011-05-20. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200084848>.

При разработке и проектировании конструкций МСП для газового месторождения в Азовском море именно ледовые нагрузки являются основными и определяющими напряженное состояние всей стационарной платформы.

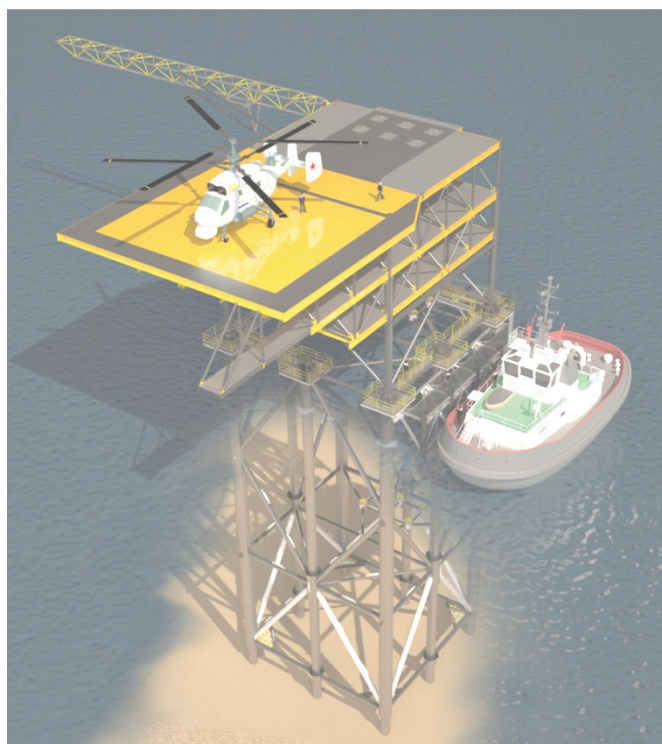


Рис. 1. Схема морской стационарной платформы (МСП)

На рисунке 2 показано взаимодействие льдов и опорных стоек блоков морских стальных стационарных платформ для газового месторождения в Азовском море.



Рис. 2. Ледовая обстановка и взаимодействие опорных стоек МСП в Азовском море на газовом месторождении

В общем случае напряженное состояние в местах контакта льда и опорных стоек МСП определяется сложным и комплексным механизмом взаимодействия массы льда, геометрическими и физико-механическими параметрами материала стальных стоек. Для уменьшения воздействия льда на опорные стойки МСП в местах контакта устанавливают специальные конструкции — конусные ледоразрушающие устройства⁴.

Объект и методы исследования

С целью повышения несущей способности опорных стоек предложено внутренний объем ледоразрушающего устройства заполнять бетоном (цементом) [9, 10].

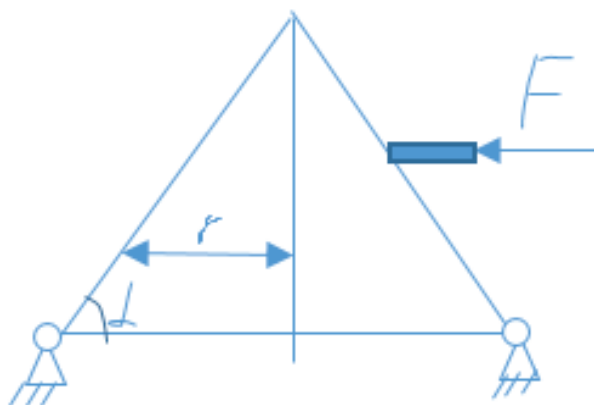


Рис. 3. Расчетная модель конусной обечайки
(F — сила ледового воздействия)

Аналитическое исследование напряженного состояния ледоразрушающих устройств проведем на основе общих положений теории упругости тонких пластинок, для которых справедлива гипотеза плоских сечений [11–13].

При разработке математической модели ледоразрушающего устройства в основу положено следующее конструктивное решение — опорная стойка представлена пространственной конструкцией, состоящей из труб и листового металлического конуса. Конус установлен в зоне переменного смачивания, которая совпадает с зоной ледового воздействия. На первом этапе проводим изучение напряженного состояния элементов конуса, далее внутреннее пространство конусной конструкции заполняется бетоном [9], что позволяет подкрепить металлический листовый конический кожух ледоразрушающего устройства (F).

Рассмотрим прочность конусообразной обечайки. Решение осуществим в полярной системе координат. На рисунке 3 представлена расчетная модель конусной обечайки, к которой приложена горизонтальная сила, имитирующая ледовое воздействие.

Примем допущение: радиальные напряжения больше тангенциальных, то есть $\sigma_r \gg \sigma_\theta$; объемные силы не учитываются.

Такое напряженное состояние называется простым радиальным, и уравнение равновесия имеет вид [12, 13]

⁴ СНиП 2.06.04-82*...

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r}{r} = 0. \quad (1)$$

Уравнение неразрывности деформаций представим в виде

$$\frac{\partial^2 \sigma_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \sigma_r}{\partial \theta^2} = 0. \quad (2)$$

Интегрируем уравнения (1) и (2) методом Фурье, для чего представим функцию радиальных напряжений σ_r в виде произведения функций $\varphi(r), \varphi(\theta)$:

$$\sigma_r(r, \theta) = \varphi(r) \cdot \varphi(\theta). \quad (3)$$

Подставив функцию (3) в (1) и (2), получим следующие уравнения:

$$\begin{cases} \varphi' \omega + \frac{\sigma \omega}{r} = 0 \\ \varphi' \omega + \frac{\varphi' \omega}{r} + \frac{\varphi \omega''}{r^2} = 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Первое уравнение можно записать в виде

$$\varphi'(r) + \frac{1}{r} \varphi(r) = 0 \quad (5)$$

или

$$\frac{\varphi'}{\varphi} = -\frac{1}{r}. \quad (6)$$

Интегрируя соотношение (6), можно записать

$$\int \frac{d\varphi}{\varphi} = \int \frac{dr}{r}. \quad (7)$$

Окончательно можно записать для функции $\varphi(r)$ следующее соотношение:

$$\ln \varphi = \ln \left(\frac{c}{r} \right) \quad (8)$$

или

$$\varphi(r) = \frac{c}{r}, \quad (9)$$

где c — постоянная интегрирования.

Функцию φ подставим во второе уравнение (4), получим

$$\frac{2c}{r^3} \omega - \frac{c}{r^3} \omega + \frac{c}{r^3} \omega'' = 0 \quad (10)$$

или

$$\omega + \omega'' = 0. \quad (11)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\omega = A \cos \theta + B \sin \theta. \quad (12)$$

Соотношения (9) и (12) подставим в (3) и получим для σ_r формулу

$$\sigma_r = \frac{c(A \cos \theta + B \sin \theta)}{r}. \quad (13)$$

Введем произвольные постоянные K и θ_0 , (см. рис. 3)

$$CA = -K \cos \theta_0; CB = -K \sin \theta_0. \quad (14)$$

В этом случае можно найти для σ_r соотношение

$$\sigma_r = \frac{k}{r} (\cos \theta \cos \theta_0 + \sin \theta \sin \theta_0) \quad (15)$$

или

$$\sigma_r = \frac{k}{r} \cos(\theta - \theta_0), \quad (16)$$

где θ — угол давления льда. Значение K найдем из граничного условия, при $\theta = \theta_0$

$$\sigma_r = \frac{F_1}{r_1 \theta_0 \Delta l} = \frac{F \sin \alpha}{r_1 \theta_0 \Delta l}, \quad (17)$$

где Δl — толщина льдины.

Тогда

$$\frac{F \sin \alpha}{r_1 \theta_0 \Delta l} = -\frac{k}{r_1}, \text{ или } k = -\frac{F \sin \alpha}{\theta_0 \Delta l}.$$

В этом случае общее решение имеет вид

$$\sigma_r = \frac{F \sin \alpha}{r_1 \theta_0 \Delta l} \cos(\theta - \theta_0) \leq [\sigma]. \quad (18)$$

Полученное выражение (18) определяет условие прочности материала конусной обечайки.

Для получения конкретных результатов расчетов напряженного состояния ледоразрушающего устройства использован аппарат программного комплекса «Ansys17.2» [14].

Ansys известен на рынке уже более 20 лет и является наиболее распространенным средством для научных и инженерных расчетов. Особенностью Ansys является широкий спектр задач, которые он в состоянии решать. Сюда входят задачи расчетов на прочность (как линейные, так и нелинейные), теплообмена, гидродинамики, смешанные и даже акустики.

В качестве основного метода в программном комплексе «Ansys» используется «метод конечных элементов».

Сущность метода состоит в аппроксимации исследуемого тела некоторой моделью, которая представляет собой совокупность элементов конечным числом степеней свободы. Эти элементы взаимосвязаны только в узловых точках, куда прикладываются фиктивные силы, эквивалентные поверхностным напряжениям, распределенным по границам элементов. Параметры приведенной идеализированной системы определяются исходя из соответствующих вариационных решений.

Метод конечных элементов позволяет значительно уменьшить затраты при разработке новых изделий, так как позволяет существенно сократить объемы или даже полностью отказаться от дорогостоящих стендовых испытаний. Кроме того, с помощью метода конечных элементов можно в сравнительно короткие сроки оценить характеристики разных вариантов конструкций и выбрать наилучшую [14].

При создании расчетной модели использовались крупномасштабные модели 1:6 узла ледоразрушающего устройства.

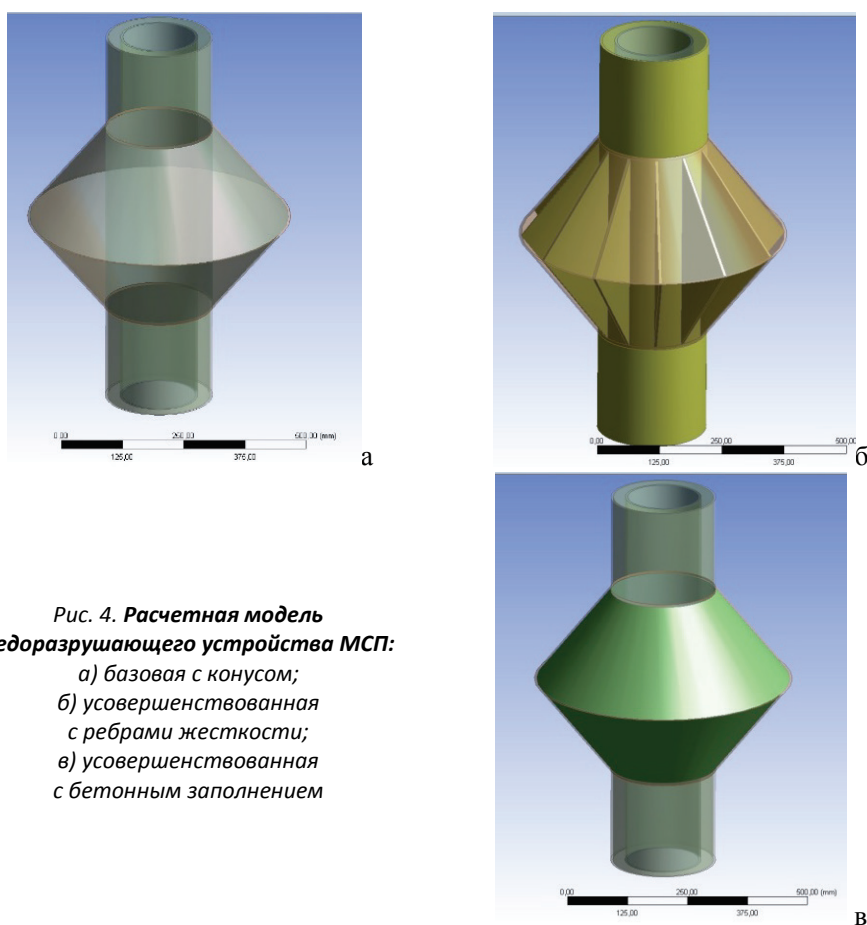


Рис. 4. Расчетная модель ледоразрушающего устройства МСП:
 а) базовая с конусом;
 б) усовершенствованная с ребрами жесткости;
 в) усовершенствованная с бетонным заполнением

Моделирование имитировало возможное нагружение от ледового поля в естественных условиях, заданное согласно рекомендациям института им. Б. Е. Веденеева по определению ледовых нагрузок⁵. В расчетах принято, что МСП пред-

⁵ Там же.

ставляют собой сложное инженерное сооружение, состоящее из опорного блока, закрепленного к морскому дну (грунту) с помощью трубчатых свай, и верхнего строения, используемого для установки технологического оборудования для добычи и дальнейшей транспортировки нефти и газа. Суммарная расчетная ледовая нагрузка (для случая одновременного действия на две опоры) составляет 1 110 тс.

Были разработаны три расчетные модели устройства для защиты морской стационарной платформы от воздействия льда.

Первая — базовая модель с конусом без усиления. Опорная стойка представлена пространственной конструкцией, состоящей из труб и листового металлического конуса. Конус установлен в зоне переменного смачивания, которая совпадает с зоной ледового воздействия. Композитная труба-стойка состоит из двух труб: внутренней, сечением — 219×6 ; внешней, сечением — 159×6 ; межтрубное пространство заполнено бетоном.

Вторая — усовершенствованная модель. Конструктивно усовершенствованная модель повторяет во многом базовую модель, усовершенствование заключалось в установке в конусном устройстве ребер жесткости, подкрепляющих пластины конуса.

Третья — усовершенствованная модель. Конструктивно усовершенствованная модель повторяет базовую модель, но внутреннее пространство конусных конструкций заполнено бетоном [9], что позволяет подкрепить металлический листовой конический кожух по всей плоскости, а не дискретно, как это было во второй модели с ребрами жесткости. Результаты других исследований показывают, что при контакте льда с такой конической защитной конструкцией опорной стойки разрушение ледового поля происходит от изгиба, а не от сжатия. Что в первую очередь ведет к разрушению льда при более низких значениях напряжений, и, как следствие, такое ледовое воздействие приводит к снижению контактного давления на опору (рис. 4).

Результаты численных экспериментов представлены в виде изополей деформаций и изополей эквивалентных напряжений в элементах для защиты опорных стоек от воздействия льда (рис. 5).

Результаты

Представленные на рисунке 5 перемещения узлов моделей показывают, что максимальные перемещения в узлах базовой модели с конусом без усиления (см. рис. 5 а) в районе воздействия льда составляют 4,5 см, в то время как в усовершенствованной конструкции вследствие увеличения цилиндрической жесткости опорной стойки в зоне ледового воздействия и благодаря усиленной бетоном конусной конструкции перемещения составляют 0,2 см (см. рис. 5 б). Таким образом, перемещения снизились в 20 раз относительно базовой модели и в 5 раз относительно модели с ребрами усиления. В модели, усиленной металлическими ребрами, деформации также снизились в 4 раза, но, как можно видеть на рисунке 5 в, деформации носят дискретный характер и увеличиваются в зонах между ребрами жесткости в отличие от композитной конструкции, где деформации распределяются равномерно, бетон включен в работу по всей стенке конуса.

На рисунке 6 показаны изополя эквивалентных напряжений для всех вариантов ледоразрушающих устройств МСП для условий газового месторождения в Азовском море.

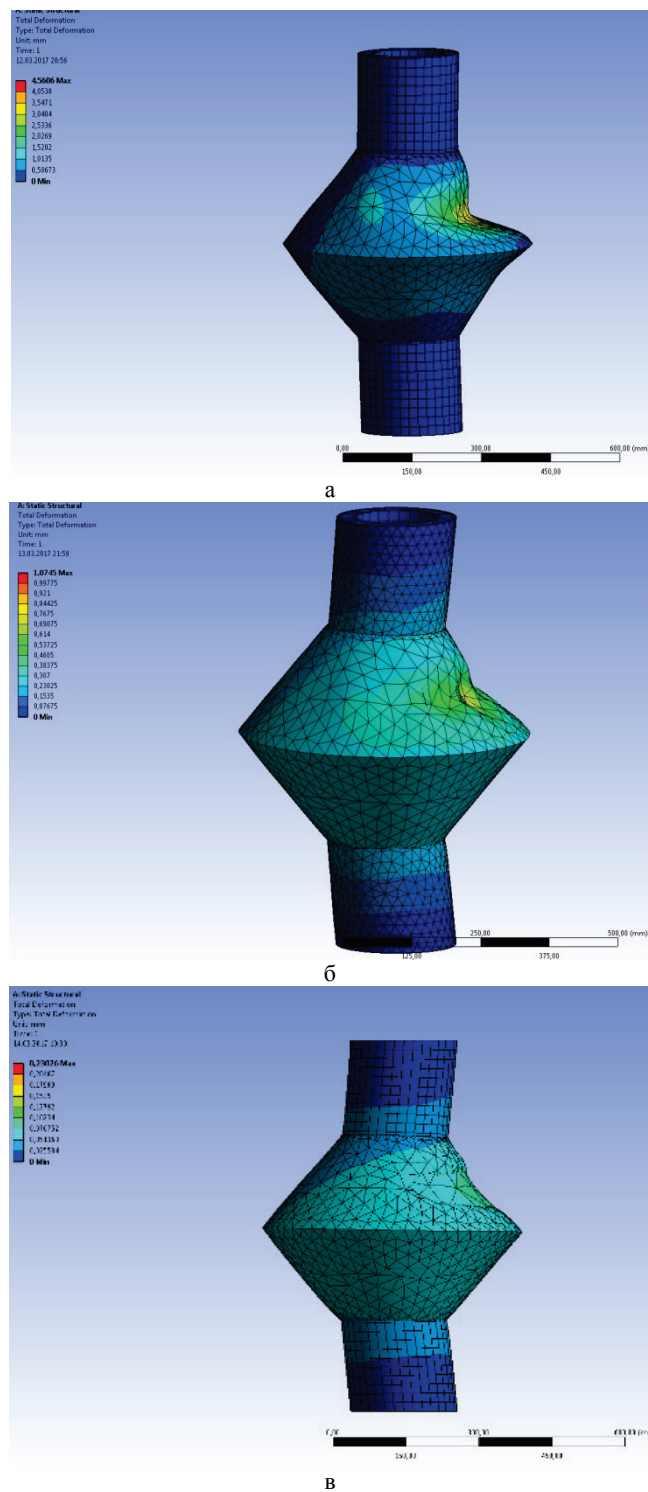


Рис. 5. Изополя нормальных перемещений узлов модели опорной стойки МСП:
а) базовая с конусом без усиления;
б) усовершенствованная с металлическими ребрами;
в) усиленная бетоном

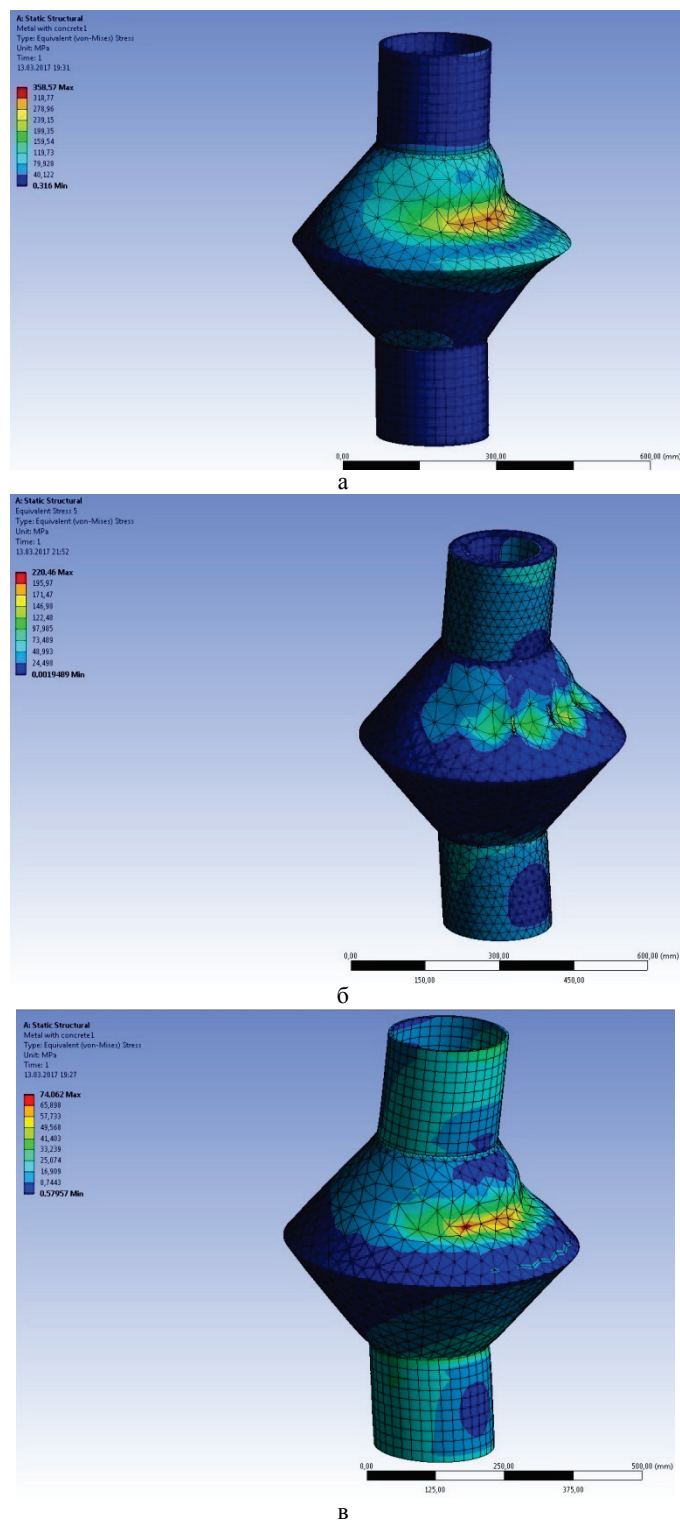


Рис. 6. Изополя эквивалентных напряжений в элементах фрагмента модели опорной стойки МСП: а) базовая с конусом без усиления; б) усовершенствованная (усиленная металлическими ребрами; в) усовершенствованная (усиленная бетоном)

На *рисунке 6 а* представлены изополя эквивалентных напряжений в элементах базовой модели. Напряжения в элементах базовой модели изменяются в пределах, что выше уровня расчетного сопротивления металла элементов.

На *рисунке 6 б* представлены изополя эквивалентных напряжений в элементах усовершенствованной модели (усиленной металлическими ребрами). Напряжения в элементах усовершенствованной модели изменяются в пределах, что близко к уровню расчетного сопротивления металла элементов и в 1,6 раза ниже уровня напряжений в аналогичных элементах базовой модели.

На *рисунке 6 в* представлены изополя эквивалентных напряжений в элементах усовершенствованной модели (усиленной бетоном). Напряжения в элементах усовершенствованной модели изменяются в пределах, что ниже уровня расчетного сопротивления металла элементов и в 3,7 раза ниже уровня напряжений в аналогичных элементах базовой модели.

Выводы

1. Усовершенствование опорной стойки МСП путем установки конусных конструкций, усиленных бетоном в зоне контакта, приводит к разрушению ледового поля от изгиба, а не от сжатия. При этом горизонтальное давление льда на опору снижается. Вследствие этого снижается уровень напряжений в элементах опорной стойки МСП. Напряжения в базовой модели ледозащитного конуса превышают расчетное сопротивление металла элементов и составляют 358 МПа.

2. При дальнейшем усовершенствовании ледоразрушающего устройства путем установки металлических ребер жесткости напряжения в элементах снижены в 1,6 раза — до 220 МПа; в модели, усиленной бетоном, за счет трехосного сжатия бетона напряжения уменьшились в 3,7 раза по сравнению с уровнем напряжений в аналогичных элементах базовой модели и в 1,7 раза по сравнению с моделью с металлическими ребрами жесткости.

3. Деформации элементов в направлении силового ледового воздействия снизились с 4 см в базовой модели до 1 см в усиленной ребрами модели ледоразрушающего устройства, то есть в 4 раза, и до 0,2 см в модели усиленной бетоном, то есть в 20 раз.

4. Применение композитной конструкции ведет к увеличению жесткости и прочности конструкции для защиты МСП от воздействия льда.

Библиографический список

1. Геология СССР. Том 8. Крым. Часть 1. Геологическое описание / Под ред. М. В. Муратова, А. В. Сидоренко. — М.: Недра, 1969. — 576 с.
2. Иванов С. И. Прогнозные оценки углеводородных ресурсов на морских месторождениях Азово-Черноморского шельфа. — М.: ВНИИОЭНГ, 2004. — 71 с.
3. Региональная геология и перспективы нефтегазоносности Черноморской глубоководной впадины и прилегающих шельфовых зон. В 2 ч. Часть 2 / И. Ф. Глумов [и др.]. — М.: Недра, 2014. — 181 с.
4. Рагинский Б. А. Сооружение буровых на морских нефтяных участках. — М.: Гостоптехиздонт, 1948. — 64 с.
5. Кулиев И. П. Основные вопросы строительства нефтяных скважин в море. — Баку: Азнефтеиздат, 1958. — 374 с.
6. Халфин И. Ш. Строительство глубоководных стационарных платформ для освоения морских месторождений нефти и газа. — М.: ВНИИОЭНГ, 1976. — 71 с.
7. Смагин И. Ф. Перспективы строительства морских стационарных глубоководных платформ // Азербайджанское нефтяное хозяйство. — 1979. — № 8–9. — С. 34–37.
8. Дворецкий В. И., Гаджиев Р. А., Мамедов Б. М. К вопросу проектирования морских нефтепромысловых стационарных платформ // Азербайджанское нефтяное хозяйство. — 1983. — № 9. — С. 50–52.

9. Фурсов А. Ю., Синцов В. П. Устройство для защиты гидротехнического сооружения от воздействия льда. Патент РФ на полезную модель № 151969. Заявка № 2014154667. Приоритет полезной модели 24.03.2014.
10. Синцов В., Фурсов А. Типы морских стационарных платформ используемых ГАО «Черноморнефтегаз» на шельфе черного и азовского морей // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – 2012. – Т. 14, № 6. – С. 39–44.
11. Чемодуров В. Т. Проблема обеспечения прочности и надежности ракет и пусковых установок. – Л.: ВМА, 1985 г. – 198 с.
12. Рекач В. Г. Руководство к решению задач прикладной теории упругости: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1973. – 384 с.
13. Беляев Н. М. Сопротивление материалов: учеб. пособие. – 15-е изд., перераб. – М.: Наука, 1976. – 607 с.
14. Чигарев А. В., Кравчук А. С., Смалюк А. Ф. ANSYS для инженеров: справ. пособие. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.

References

1. Muratova, M. V., & Sidorenko, A. V. (1969). Geologiya SSSR. Tom 8. Krym. Chast' 1. Geologicheskoe opisanie. Moscow, Nedra Publ., 576 p. (In Russian).
2. Ivanov, S. I. (2004). Prognoznye otsenki uglevodorodnykh resursov na morskikh mestorozhdeniyakh Azovo-Chernomorskogo shel'fa. Moscow, VNIIOENG Publ., 71 p. (In Russian).
3. Glumov, I. F., Gulyaev, V. L., Senin, B. V., & Karnauhov, S. M. (2014). Regional'naya geologiya i perspektivy neftegazonosnosti Chernomorskoy gluboko-vodnoy vpadiny i prilgayushchikh shel'fovyykh zon. V 2 chastyakh. Chast' 2. Moscow, Nedra Publ., 181 p. (In Russian).
4. Raginskiy, B. A. (1948). Sooruzhenie burovykh na morskikh neftyanykh uchastkakh. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 64 p. (In Russian).
5. Kuliev, I. P. (1958). Osnovnye voprosy stroitel'stva neftyanykh skvazhin v more. Baku, Aznefteizdat Publ., 374 p. (In Russian).
6. Khalfin, I. Sh. (1976). Stroitel'stvo glubokovodnykh statsionarnykh platform dlya osvoeniya morskikh mestorozhdeniy nefti i gaza. Moscow, VNIIOENG Publ., 71 p. (In Russian).
7. Smagin, I. F. (1979). Perspektivy stroitel'stva morskikh statsionarnykh glubokovodnykh platform. Azerbaydzhanskoe neftyanoe khozyaystvo, (8-9), pp. 34-37. (In Russian).
8. Dvoretzkiy, V. I., Gadzhiev, R. A., & Mamedov, B. M. (1983). K voprosu proektirovaniya morskikh neftepromyslovykh statsionarnykh platform. Azerbaydzhanskoe neftyanoe khozyaystvo, (9), pp. 50-52. (In Russian).
9. Fursov, A. Yu., & Sintsov, V. P. Ustroystvo dlya zashchity gidrotekhnicheskogo sooruzheniya ot vozdeystviya l'da. Patent RF na poleznuyu model' No 151969. Zayavka No 2014154667. Prioritet poleznoy modeli 24.03.2014. (In Russian).
10. Sintsov, V., & Fursov, A. (2012). Tipy morskikh statsionarnykh platform ispol'zuemykh GAO "Chernomorneftegaz" na shel'fe chernogo i azovskogo morey. MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences, 14(6), pp. 39-44. (In Russian).
11. Chemodurov, V. T. (1985). Problema obespecheniya prochnosti i nadezhnosti raket i puskovykh ustanovok. – Leningrad, VMA Publ., 198 p. (In Russian).
12. Rekach, V. G. (1973). Rukovodstvo k resheniyu zadach prikladnoy teorii uprugosti. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 384 p. (In Russian).
13. Belyaev, N. M. (1976). Soprotivlenie materialov. 15th edition, revised. Moscow, Nauka Publ., 607 p. (In Russian).
14. Chigarev, A. V., Kravchuk, A. S., & Smalyuk, A. F. (2004). ANSYS dlya inzhenerov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 512 p. (In Russian).

Сведения об авторе

Фурсов Александр Юрьевич, аспирант кафедры строительных конструкций, Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, г. Симферополь, e-mail: alexandrpro3@gmail.com

Information about the author

Alexandr Yu. Fursov, Postgraduate at the Department of Construction Structures, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, e-mail: alexandrpro3@gmail.com