

УДК 624.075
МРНТИ 67.11.35

DOI: [10.54859/kjogi108583](https://doi.org/10.54859/kjogi108583)

Получена: 04.08.2022.
Одобрена: 05.02.2026.
Опубликована: 31.03.2026.

Оригинальное исследование

Расчёты ледостойкой сателлитной платформы для казахстанского сектора Каспийского моря

Н.К. Альжанов, М.Т. Тлешев
КМГ Инжиниринг, Астана, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В казахстанском секторе Каспийского моря возникают проблемы экономической эффективности, экологической устойчивости и безопасности операций. В связи с этим встает необходимость разработки инновационной нефтедобывающей платформы. В рамках этого предлагается создать беспилотную платформу с минимальным технологическим оборудованием, предназначенную для использования в качестве сателлитной платформы в проектах на шельфе северной части Каспийского моря. Разработка ледостойкой платформы является ключевой задачей для успешной добычи нефти в ледовых условиях.

Цель. Целью исследования является разработка модернизированной автономной нефтяной платформы, пригодной для использования в северной части Каспийского моря, способной выдерживать статические столкновения с ледяными глыбами.

Материалы и методы. Проанализированы существующие морские ледостойкие платформы, такие как Варандейский терминал (Россия), Бохай Си (Китай), Филановский (Россия) и Буфарт Си (Канада). Осуществлен расчёт ледовых нагрузок в соответствии с международным стандартом ISO 19906. Проведён анализ, демонстрирующий способность кесонной конструкции выдерживать статические нагрузки от ледяных глыб.

Результаты. Модернизированная конструкция платформы и метод её фиксации к поверхности с помощью всасывающих колонн и свайного крепления показали способность к устойчивому сопротивлению различным нагрузкам с соблюдением международных стандартов безопасности, включая статические нагрузки от ледяных глыб.

Заключение. Проведённые расчёты и анализ подтверждают целесообразность инвестирования в разработку модернизированной автономной нефтяной платформы, обладающей улучшенной ледостойкостью и соответствующей всем требованиям безопасности для эксплуатации в условиях северной части Каспийского моря.

Ключевые слова: беспилотная платформа, ледостойкая платформа, сателлитные платформы, деформация, интегрированный модуль, всасывающее основание.

Как цитировать:

Альжанов Н.К., Тлешев М.Т. Расчёты ледостойкой сателлитной платформы для казахстанского сектора Каспийского моря // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2026. Том 8, №1. С. 98–112. DOI: [10.54859/kjogi108583](https://doi.org/10.54859/kjogi108583).

UDC 624.075
CSCSTI 67.11.35

DOI: [10.54859/kjogi108583](https://doi.org/10.54859/kjogi108583)

Received: 04.08.2022.

Accepted: 05.02.2026.

Published: 31.03.2026.

Original article

Structural Calculations of an Ice-Resistant Satellite Platform for the Kazakh Sector of the Caspian Sea

Nursultan K. Alzhanov, Maxat T. Tleshev

KMG Engineering, Astana, Kazakhstan

ABSTRACT

Background: The Kazakh sector of the Caspian Sea faces problems of economic efficiency, environmental sustainability, and operational safety. This necessitates the development of an innovative oil production platform. Within this framework, it is proposed to create an unmanned platform with minimal technological equipment, designed for use as a satellite platform in projects on the northern Caspian Sea shelf. The development of an ice-resistant platform is a key task for successful oil production in ice conditions.

Aim: The research is aimed at developing an ice-resistant platform design capable of withstanding static collisions with ice floes. The objective of the research is to develop a modernized autonomous oil platform suitable for use in the northern part of the Caspian Sea.

Materials and methods: Existing offshore ice-resistant platforms were analyzed, including the Varandey terminal (Russia), Bohai Sea (China), Filanovsky (Russia), and Bufart Sea (Canada). Ice loads were calculated in accordance with the international standard ISO 19906. An analysis was conducted demonstrating the ability of the caisson structure to withstand static loads from ice floes.

Results: The modernized platform design and the method of fixing it to the surface using suction columns and pile fastenings demonstrated the ability to withstand various loads in compliance with international safety standards, including static loads from ice floes.

Conclusion: The calculations and analysis confirm the feasibility of investing in the development of a modernized autonomous oil platform with improved ice resistance and meeting all safety requirements for operation in the northern part of the Caspian Sea.

Keywords: *unmanned platform; ice-resistant platform; satellite platforms; deformation; integrated module; suction base.*

To cite this article:

Alzhanov NK, Tleshev MT. Structural Calculations of an Ice-Resistant Satellite Platform for the Kazakh Sector of the Caspian Sea. *Kazakhstan journal for oil & gas industry*. 2026;8(1):98–112.

DOI: [10.54859/kjogi108583](https://doi.org/10.54859/kjogi108583).

ӨОЖ 624.075
ГТАХР 67.11.35

DOI: [10.54859/kjogi108583](https://doi.org/10.54859/kjogi108583)

Қабылданды: 04.08.2022.

Мақұлданды: 05.02.2026.

Жарияланды: 31.03.2026.

Түпнұсқа зерттеу

Қазақстанның Каспий теңізі секторы үшін мұзға төзімді сателлиттік платформаның есептеулері

Н.Қ. Әлжанов, М.Т. Тлешев

ҚМГ Инжиниринг, Астана қаласы, Қазақстан

АННОТАЦИЯ

Негіздеу. Каспий теңізінің қазақстандық секторында экономикалық тиімділік, экологиялық орнықтылық және операциялар қауіпсіздігі мәселелері туындайды. Осыған байланысты инновациялық мұнай өндіру платформасын әзірлеу қажеттілігі өзекті болып отыр. Осы мақсатта Каспий теңізінің солтүстік бөлігінің шельфіндегі жобаларда сателлиттік платформа ретінде пайдалануға арналған минималды технологиялық жабдықпен жабдықталған пилотсыз платформа құру ұсынылады. Мұзға төзімді платформаны әзірлеу мұз жағдайында табысты мұнай өндірудің негізгі міндеті болып табылады.

Мақсаты. Зерттеудің мақсаты Каспий теңізінің солтүстік бөлігінде пайдалануға жарамды, мұз массаларымен статикалық соқтығысуға төтеп бере алатын жетілдірілген автономды мұнай платформасын әзірлеу болып табылады.

Материалдар мен әдістер. Варандей терминалы (Ресей), Бохай Си (Қытай), Филяновский (Ресей) және Буфарт Си (Канада) сияқты теңізде мұзға төзімді қолданыстағы платформалар талданды. ISO 19906 халықаралық стандартына сәйкес мұз жүктемелерін есептеу жүзеге асырылды. Кесон құрылымының мұз массаларының статикалық жүктемелерге төтеп беру қабілетін көрсететін талдау жүргізілді.

Нәтижелері. Платформаның жаңартылған конструкциясы және оны сорғы бағандары мен қадаларды бекіту арқылы бетіне бекіту әдісі халықаралық қауіпсіздік стандарттарын, соның ішінде мұз блоктарынан статикалық жүктемелерді сақтай отырып, әртүрлі жүктемелерге тұрақты қарсы тұра алатынын көрсетті.

Қорытынды. Жүргізілген есептеулер мен талдау мұзға төзімділігі жақсартылған және Каспий теңізінің солтүстік бөлігінде пайдалану үшін барлық қауіпсіздік талаптарына сәйкес келетін жаңғыртылған дербес мұнай платформасын әзірлеуге инвестициялаудың орындылығын растайды.

Негізгі сөздер: пилотсыз платформа, мұзға төзімді платформа, сателлиттік платформалар, деформация, интеграцияланған модуль, сорғыш табан.

Дәйексөз келтіру үшін:

Әлжанов Н.Қ., Тлешев М.Т. Қазақстанның Каспий теңізі секторы үшін мұзға төзімді сателлиттік платформаның есептеулері // Қазақстанның мұнай-газ саласының хабаршысы. 2026. 8 том, №1, 98–112 б. DOI: [10.54859/kjogi108583](https://doi.org/10.54859/kjogi108583).

Введение

В казахстанском секторе Каспийского моря (далее – КСКМ) имеется несколько задач, обусловленных эффективностью инвестиций и рисками в области безопасности жизнедеятельности. Применяемые сейчас технологии, такие как кессонные и каркасные сооружения, не в полной мере соответствуют инвестиционным требованиям. Предлагаемая система должна решить ключевые задачи, основанные на экономике, экологии и безопасности. В этой связи представляется беспилотная платформа с минимальным технологическим оснащением, которая может применяться в качестве спутниковой платформы в северо-каспийских проектах.

Разведка нефти на шельфе в ледяных регионах представляет собой уникальную задачу, требующую разработки ледостойких платформ. Существующая литература даёт представление о различных аспектах проектирования, строительства и эксплуатации ледостойких платформ, о чём свидетельствуют ключевые исследования [1, 2]. Так, Варандейский терминал в России является примером устойчивости к экстремальным холодам: его уникальная конструкция с опорной базой и вращающимся причально-грузовым устройством обеспечивает эксплуатационную универсальность. В Бохайском море в Китае исследования сосредоточены на экономически эффективных платформах, способных противостоять усталости, вызванной льдом, что подчёркивает важность учёта факторов окружающей среды при проектировании конструкций [3–5]. Поэтапный подход к разработке месторождения им. Филановского в России иллюстрирует важность комплексного планирования инфраструктуры в арктических условиях [6]. Тем временем мобильный арктический кессон «Моликпак» в Канаде демонстрирует инновационные конструктивные решения для экстремальных ледовых условий [7, 8].

Некоторые прикладные решения описаны в ряде зарубежных авторских исследований. Li G., et al, [9] предлагают экономически эффективную модель проектирования ледостойких платформ на протяжении всего жизненного цикла, демонстрируя её превосходство над традиционными конструкциями. Zhang D. & Yue Q. [10] обсуждают основные проблемы проектирования платформ для мелководных нефтяных месторождений в умеренных ледовых условиях, акцентируя на необходимости создания экономических и безопасных конструкций. Voiko A.Y. [11] рассматривает конкретные проблемы разработки ледостойких платформ для Долгинского месторождения, выступая за использование GBS-конструкций (*англ.* Gravity-Based Structures – гравитационные конструкции) в суровых ледовых условиях.

Vuchkov D.A. [12] представляет пример платформы «Приразломная», играющей уникальную роль в добыче углеводородов в суровых ледовых условиях. Sharapov D. [13] представляет обзор

ледовых факторов, влияющих на арктические платформы, подчёркивая необходимость в передовых инженерных методах. Du X., et al, [14] сосредоточились на ледостойких технологиях в Бохайском море, рекомендуя расчётные параметры морского льда. Korneeva Ya.A. [15] исследует факторы риска для работников ледостойких платформ, уделяя особое внимание безопасности и эффективному управлению чрезвычайными ситуациями.

В целом все исследования подчёркивают междисциплинарный характер разработки ледостойких платформ, обеспечивающих безопасную разведку в сложных условиях.

Ørsted, признанный лидер в области технологий suction bucket jacket (всасывающий кессонный фундамент, далее – SBJ), вошёл в историю, развернув первый в мире SBJ на Borkum Riffgrund 1 в 2014 г., и с тех пор продолжает продвигать решения SBJ для морских ветроэнергетических проектов. При установке всасывающих колонн устраняется необходимость в механической силе, но создаётся сложность из-за ограниченного опыта в отрасли. Хотя технология SBJ имеет определённые ограничения, компания Ørsted использует её инновационное применение для повышения гибкости фундаментальных решений при строительстве морских ветряных электростанций [16].

Беспилотные нефтяные платформы становятся всё более популярными среди нефтедобывающих компаний благодаря своей автономной работоспособности, экономичности и экологичности. Они используются в таких нефтедобывающих странах, как Норвегия, Великобритания, ОАЭ и др. В некоторых странах на автономные платформы приходится более половины от общего числа платформ [17, 18]. Фактически большинство этих стран добывают нефть в незамерзающих морских условиях, где ледовая нагрузка не учитывается, в то время как в северной части Каспийского моря наблюдается сезонное образование льда на поверхности моря. Следовательно, до реализации идеи необходимо предложить новую ледостойкую беспилотную нефтяную платформу, которая сможет выдерживать возможные ледовые нагрузки в Северном Каспии.

Новизна предложенной технологии заключается в нескольких аспектах:

1. *Применение всасывающих свай наряду с обычными.* Это инновационное решение способствует обеспечению более крепкой устойчивости платформы к различным нагрузкам, таким как статические нагрузки от ледяных глыб, динамические ледовые воздействия, волновые нагрузки и другие воздействия.

2. *Концепция платформы.* Предлагается ледостойкая монобашенная (кессонная) конструкция с интегрированным модулем и всасывающим основанием. Это новаторское решение обеспечивает дополнительную устойчивость и надёжность платформы в условиях морских льдов.

3. *Детали конструкции.* Всасывающее основание и сваи являются основой предлагаемой системы. Эти элементы обеспечивают уникальные характеристики платформы и её способность эффективно справляться с воздействием ледяных условий.

В совокупности данные аспекты делают технологию инновационной и важной в области создания ледостойких платформ для работы в условиях суровых морских климатических условий.

Материалы и методы

Для расчёта ледовых нагрузок на конические морские конструкции существует стандарт ISO 19906:2019 «Морские конструкции в Арктике в нефтяной и газовой промышленности» [19]. Оценка ледовой нагрузки на конструкцию платформы полностью основана на данном стандарте, согласно которому такие конические конструкции должны выдерживать ледовую нагрузку в горизонтальном и вертикальном направлениях с некоторым запасом прочности.

Простая схема взаимодействия льда и конструкции между морским льдом и конструкцией с наклонной поверхностью представлена на рис. 1.

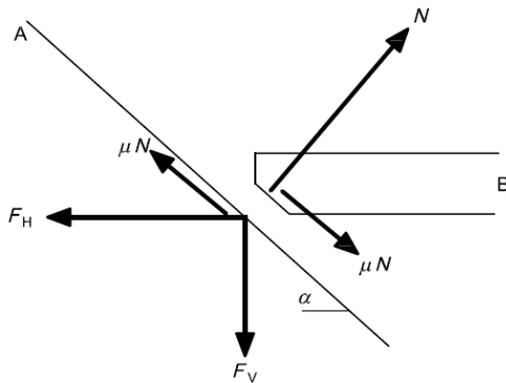


Рисунок 1. Компоненты ледового воздействия на наклонной конструкции для двумерного условия [19]

Figure 1. Components of ice action on an inclined structure for a two-dimensional condition [19]

A – наклонная грань конструкции / inclined face of the structure; α – угол наклона грани конструкции от горизонтали, радиан / inclination angle of the structure face from horizontal, a radian; *B* – наступающий ледяной блок / approaching ice block; F_H – горизонтальная составляющая ледового воздействия, *H* / horizontal component of ice load, *H*; N – нормальная составляющая реакции на воздействие льда на конструкцию, *N* / normal component of the reaction to ice action on the structure, *N*; F_V – вертикальная составляющая воздействия льда, *H* / vertical component of ice action, *N*; μ – коэффициент трения ледяной конструкции / coefficient of friction of the ice-structure interface

На рис. 1 изображены компоненты действия ровного льда для двумерного взаимодействия с восходящей структурой. Горизонтальная (F_H) и вертикальная (F_V) составляющие воздействия льда определяются уравнениями (1–2):

$$F_H = N \sin \alpha + \mu N \cos \alpha \tag{1}$$

$$F_V = N \cos \alpha - \mu N \sin \alpha \tag{2}$$

где *N* – составляющая, нормальная к поверхности конструкции, *H*; α – угол наклона поверхности конструкции от горизонтали, радиан; μ – коэффициент кинетического трения между льдом и поверхностью конструкции.

Отношение между вертикальной (F_V) и горизонтальной (F_H) составляющими задаётся следующим уравнением (3):

$$F_V = \frac{F_H}{\xi} \tag{3}$$

где ξ – параметр, относящийся к горизонтальным и вертикальным компонентам воздействия льда, рассчитанный по формуле (4):

$$\xi = \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \tag{4}$$

Горизонтальная составляющая (F_H) общей силы зависит от различных переменных (5):

$$F_H = \frac{H_B + H_p + H_R + H_L + H_T}{1 - \frac{H_B}{\sigma_f l_c h}} \tag{5}$$

где H_B – разрывная нагрузка, *H*; H_p – составляющая нагрузки, необходимая для проталкивания листового льда сквозь обломки льда, *H*; H_R – нагрузка, которая толкает ледяные глыбы вверх по склону через ледяной обломок, *H*; H_L – нагрузка, необходимая для подъёма обломков льда на надвигающийся ледяной покров перед его разрушением, *H*; H_T – нагрузка для поворота ледяной глыбы на вершине склона, *H*; σ_f – прочность ледяного покрова на изгиб, МПа; l_c – общая длина окружной трещины, м; *h* – толщина ледяного покрова, м.

H_B зависит от диаметра ватерлинии линейно, и, если такие переменные, как плотность воды и толщина ледяного покрова, будут увеличиваться, разрывная нагрузка будет увеличиваться нелинейно. С увеличением толщины ледяного покрова, который является частью значения L_c , данный показатель тоже будет увеличиваться (7). Это означает, что разрывная нагрузка сильно зависит от толщины ледяного покрова (6):

$$H_B = 0,68 \xi \sigma_f \left(\frac{\rho_w g h^5}{E} \right)^{0,25} \left(w + \frac{\pi^2 L_c}{4} \right) \tag{6}$$

$$L_c = \left[\frac{Eh^3}{12\rho_w g(1-v^2)} \right]^{1/4} \quad (7)$$

где w – диаметр конуса по ватерлинии или ширина наклонной конструкции, м; h – толщина ледяного покрова, м; L_c – характерная длина ледяного покрова, м; ρ_w – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; E – модуль упругости, МПа; v – коэффициент Пуассона для льда, обычно равный 0,3.

H_p – это составляющая нагрузки, необходимая для проталкивания листового льда сквозь обломки льда. Зависимость H_p от переменных, которые входят в уравнение (8), нелинейная, за исключением пористости ледяных обломков и отношения углов их касательных значений:

$$P = 0,5\mu_i(\mu_i + \mu)\rho_i g(1-e)h_r^2 \sin\alpha \cdot \left(\frac{1}{\tan\theta} - \frac{1}{\tan\alpha} \right) \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\alpha} \right) + 0,5(\mu_i + \mu)\rho_i g(1-e)h_r^2 \frac{\cos\alpha}{\tan\alpha} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\alpha} \right) + h_r h \rho_i g \frac{\sin\alpha + \mu \cos\alpha}{\sin\alpha} \quad (10)$$

Компонент нагрузки H_L определяется следующим уравнением:

$$H_L = 0,5wh_r^2 \rho_i g(1-e)\xi \left(\frac{1}{\tan\theta} - \frac{1}{\tan\alpha} \right) \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\alpha} \right) + 0,5wh_r^2 \rho_i g(1-e)\xi \cdot \tan\phi \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\alpha} \right)^2 + \xi cwh_r \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\alpha} \right) \quad (11)$$

где c – это сплочённость ледяных обломков; ϕ – угол трения ледяных обломков, радиан; h_r – высота обломков, м.

Величина нагрузки, необходимая для поворота блока в верхней части блока (H_T , определяется уравнением (12):

$$H_T = 1,5wh^2 \rho_i g \frac{\cos\alpha}{\sin\alpha - \mu \cos\alpha} \quad (12)$$

Из уравнений (9–11) можно увидеть, что существует линейная зависимость между расчётными значениями и диаметром ватерлинии (w), который является одним из наиболее важных параметров конструкции, а также ускорение свободного падения (g) и плотности льда (ρ). Чтобы учесть сжимающее напряжение внутри ледяной глыбы, вызванное горизонтальной силой, вычисленное значение подставляется в уравнение (13), которое обновляет результаты прочности на изгиб:

$$\sigma_f = \frac{F_H}{l_c h} + \sigma_f \quad (13)$$

где σ_f – начальная прочность на изгиб, МПа (14):

$$\sigma_f = 1,76e^{(-5,88v_b^{0,5})} \quad (14)$$

где v_b – объёмная доля солевого раствора, %, рассчитанная по формуле (15):

$$H_p = wh_r^2 \mu_i \rho_i g(1-e) \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\alpha} \right)^2 \frac{1}{2\tan\theta} \quad (8)$$

где h_r – высота обломков льда, м; μ_i – коэффициент трения льда о лёд; ρ_i – плотность льда, кг/м³; e – пористость ледяной крошки; θ – угол между обломками льда и горизонтальной линией, радиан.

H_R , в свою очередь, определяется следующим уравнением (9):

$$H_R = wP \frac{1}{\cos\alpha - \mu \sin\alpha} \quad (9)$$

где P – сопротивление ледяному покрову, рассчитываемое по формуле (10):

$$v_b = S \left(\frac{49,18}{|T|} + 0,53 \right) \quad (15)$$

где T – температура, °C; S – солёность льда, г/л.

Кроме того, l_c рассчитывается по следующей формуле (16):

$$l_c = w + \frac{\pi^2}{4} L_c \quad (16)$$

Учитывая, что l_c является постоянным, из уравнения (13) очевидно, что один из параметров, определяющих длину ледяных блоков, которые образуются в результате столкновения дрейфующего морского льда и конструкции платформы, окружная трещина, пропорционально зависит от диаметра ватерлинии (w) конструкции.

Основная цель данного метода – разработать инструмент для расчёта ледовой нагрузки на основе экологических параметров северной части Каспийского моря в зависимости от двух основных проектных параметров платформы: α уклона поверхности конструкции от горизонтали, и w , который представляет собой диаметр ватерлинии конус или ширину наклонной конструкции.

Для разработки инструмента расчёта ледовой нагрузки был разработан код MATLAB¹ на ос-

¹ MATLAB (сокр. от англ. Matrix Laboratory) – платформа для программирования и пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений.

нове информации, представленной в стандарте ISO 19906:2019 [19]. Для пробного запуска два различных проектных параметра, угол наклона (α) и диаметр ватерлинии (w), были заданы в следующих диапазонах (табл. 1):

Таблица 1. Проектные параметры
Table 1. Design parameters

Параметр Parameter	Минимум Minimum	Максимум Maximum
Угол наклона структуры поверхности от горизонтали (α), ° Inclination angle of the structure surface from the horizontal (α), °	11°	85°
Диаметр конуса по ватерлинии или ширина наклонной конструкции (w , м) Cone diameter at the waterline or width of the inclined structure (w), m	5 м	20 м

Для заданных проектных параметров код MATLAB дал минимальное значение для F_T полной силы, Н:

$$F_T = \sqrt{F_H^2 + F_V^2} = 4,5485 \times 10^6 \quad (17)$$

Данный результат был рассчитан при значениях 48,3737° и 5 м. Поскольку существует линейная зависимость между силой и диаметром ватерлинии, очевидно, что минимальный диаметр ватерлинии приводит к минимальной силе.

Верификация

Проверка точности расчёта ледовых нагрузок требует выполнения верификации с использованием максимальных значений силы, описанных в табл. 2, чтобы обеспечить правильность результатов.

Ледокольное строение в виде усечённой пирамиды (конуса)

На рис. 2 показан внешний вид платформы, который выполнен в виде усечённого конуса для применения на разных глубинах мелководья – от 0 до 10 м. Это позволяет использовать платформу в различных проектах с разными глубинами, а также в случае обмеления моря ледокольная конструкция сохраняет свой функционал.

Усечённая конусообразная форма позволяет дрейфующему льду обтекать и снижает риски, связанные с нагромождением льда. Высокие горизонтальные нагрузки от дрейфующего льда удерживаются за счёт ледокольного корпуса платформы, сцепленного с дном моря через всасывающие колонны и сваи (рис. 3). Необходимо учитывать влияние нагрузки верхнего строения (топсайд), которое увеличивает стабильность

платформы, но создаёт при этом дополнительные напряжения в конструкции.

Таблица 2. Физические характеристики льда и морской воды
Table 2. Physical properties of ice and seawater

Параметр Parameter	Значение Value
Угол между обломками льда и горизонтальной линией (θ), ° Angle between ice fragments and the horizontal line (θ), °	($\alpha-10$)°
Трение льда об лёд (μ) Ice-ice friction (μ)	0,035
Плотность льда (ρ), кг/м³ Ice density (ρ), kg/m³	920
Температура льда (T) (раз в 100 лет), °C Ice temperature (T) (once in 100 years), °C	-42°C
Модуль Юнга льда (E), ГПа Young's modulus of ice (E), GPa	6
Угол трения ледяного блока (ϕ), ° Friction angle of ice block (ϕ), °	40°
Сплочённость льда (c), кПа Ice cohesion (c), kPa	7
Солёность (S), г/л Salinity (S), g/L	0,002
Толщина льда (h), м Ice thickness (h), m	1,2
Высота обломков (h), м Fragment height (h), m	20
Плотность воды (ρ_w), кг/м³ Water density (ρ_w), kg/m³	1000
Ускорение, м/с² Acceleration, m/s²	9,81
Коэффициент Пуассона (ν) Poisson's ratio (ν)	0,3
Трение между сталью и льдом (μ) Steel-ice friction (μ)	0,03
Пористость щебня (e) Aggregate porosity (e)	0,4

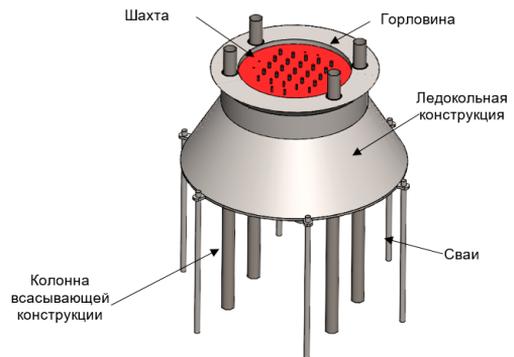


Рисунок 2. 3D модель ледостойкой беспилотной спутниковой платформы
Figure 2. 3D model of an ice-resistant unmanned satellite platform

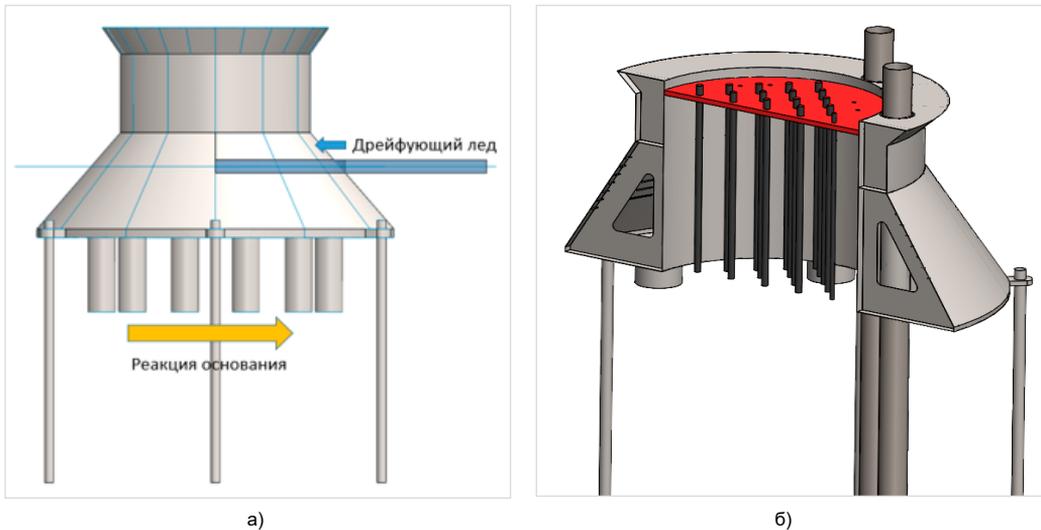


Рисунок 3. Ребра жёсткости
Figure 3. Stiffening ribs

а) вид сбоку / side view; б) в разрезе / cross-sectional view

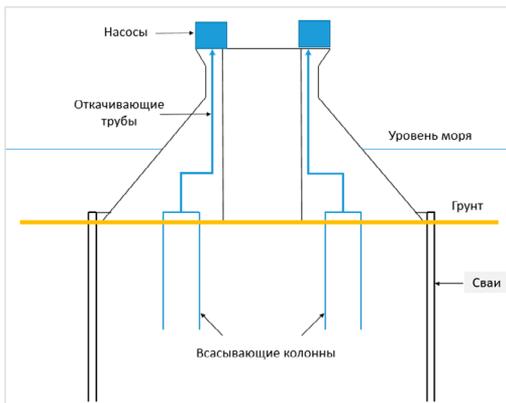


Рисунок 4. Установка ледостойкой беспилотной спутниковой платформы на море
Figure 4. Installation of an ice-resistant unmanned satellite platform at sea

Всасывающие колонны в основании платформы

Принцип всасывающей технологии заключается в том, что колонна создаёт вакуумное присосание к грунту под воздействием собственного веса платформы и полного откачивания воды из внутренней полости. Это приводит к погружению колонны в грунт за счёт разницы давлений. Схематическое изображение принципа расположения всасывающих колонн в основании платформы представлено на рис. 4.

Концепция, описанная в патенте США [20], наиболее близка к предлагаемой, однако её основным недостатком является неэффектив-

ное центрирование платформы при установке на морском дне. Существует риск неравномерного распределения напора воды по площади сечения платформы, что может привести к локальному подмыванию грунта. Более предпочтительным решением является установка отдельных всасывающих колонн в основании платформы, где напор для нагнетания воды будет менее высоким, а управление каждой колонной будет проще, что позволит выровнять платформу в целом.

Результаты и обсуждения

Были учтены природные и климатические условия региона в анализе, включая ледовые и ветровые нагрузки в северной части Каспийского моря регионе с экстремальными значениями, что соответствует вероятности повторения событий один раз в сто лет. Расчёт ледовых нагрузок проводился для льда толщиной 1,5 м, учитывая угол наклона (α) и диаметр ватерлинии (w).

Исходный проект включает три варианта автономных нефтяных платформ различных размеров для разнообразных нефтяных участков в северной части Каспийского моря:

- малая (с диаметром горловины 9 м);
- средняя (с диаметром горловины 12 м);
- большая (с диаметром горловины 15 м).

Все модели обладают одинаковым углом наклона 60° . Поскольку эти конструкции имеют разный диаметр ватерлинии, прежде чем перейти к анализу методом конечных элементов, соответствующие ледовые нагрузки для каждой платформы были рассчитаны по стандарту ISO 19906:2019 [13]. Зависимость нагрузки льда от ватерлинии показана на рис. 5.

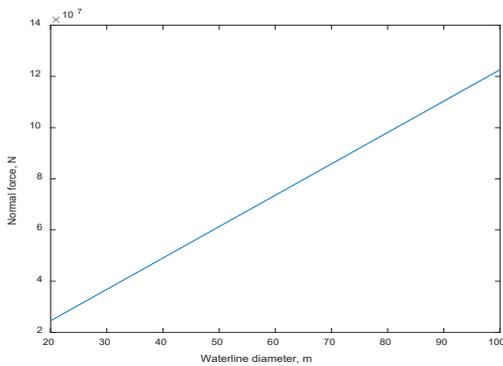


Рисунок 5. Зависимость нагрузки льда от ватерлинии
Figure 5. Ice load versus waterline

Выполнен верхнеуровневый анализ, согласно которому были рассмотрены три вида платформ с различными диаметрами горловины. Данная работа нацелена на изучение возможности интеграции двух технологий – свай и всасывающих колонн для морских нефтяных платформ. Для этого была разработана математическая модель на основе рекомендаций API RP 2A² [21], которая позволяет имитировать реальные условия в симуляциях. Поскольку наша цель – создание идеализированной модели, характеристики грунта были исключены из рассмотрения. Однако для проверки реальной эффективности модели необходимо будет провести ледовые испытания, включая тестирование различного количества свай и их глубину забивки в ледовом бассейне. Только после таких испытаний можно сделать выводы о работоспособности модели в реальных условиях.

Малая платформа (с диаметром горловины 9 м)

Для платформы малого размера результаты, полученные с использованием MATLAB-кода, представлены следующим образом: горизонтальная сила (F_H) составляет $2,84 \times 10^7$ Н, вертикальная сила (F_V) – $1,53 \times 10^7$ Н. Расчёт веса показывает значение 902 т с учётом свай и дополнительного веса в размере 30%. Кроме того, вес верхней части оценивался в 1000 т. Согласно численному моделированию в программе ANSYS FEA³, при заданных нагрузках данная платформа испытывает максимальное напряжение 241 МПа и деформацию 34 мм (рис. 6–7).

Расчёт свай для малогабаритной платформы показал следующие результаты:

Таблица 3. Несущая способность свай для малой платформы
Table 3. Load-bearing capacity of piles for small-sized platform

Номера свай Pile number	Сила реакции, Н Reaction force, N
Pile 1	1,69E+06
Pile 2	3,28E+06
Pile 3	5,18E+06
Pile 4	5,19E+06
Pile 5	3,28E+06
Pile 6	1,64E+06

Согласно API RP 2A [21], сваи с характеристиками, приведёнными ниже, могут поддерживать платформу небольшого размера и имеют максимальную пропускную способность 6,37 МН.

При расчётах конструкции сваи предлагаются сваи следующих размеров (табл. 4):

Таблица 4. Параметры сваи для малой платформы
Table 4. Pile parameters for a small platform

Внешний диаметр, мм Outer diameter, mm	Толщина стенки, мм Wall thickness, mm	Длина свай, м Pile length, m
914	16	15

Средняя платформа (с диаметром горловины 12 м)

Для платформы среднего размера ледовые нагрузки составили следующие значения: горизонтальная сила (F_H) равна $3,8869 \times 10^7$ Н, вертикальная сила (F_V) – $2,0913 \times 10^7$ Н. Максимальный вес этой конструкции составил 1326 т, включая сваи и дополнительный запас массы в размере 30%. Кроме того, для данного проекта вес верхнего строения составил 2500 т. Результаты анализа методом конечных элементов представлены на рис. 8–9.

Расчёты на платформе среднего размера показали следующие нагрузки реакции сваи (табл. 5):

Таблица 5. Несущая способность свай для средней платформы
Table 5. Load-bearing capacity of the pile for the medium-sized platform

Номера свай Pile number	Сила реакции, Н Reaction force, N
Pile 1	3,55E+06
Pile 2	7,52E+05
Pile 3	6,50E+06
Pile 4	3,92E+06
Pile 5	6,07E+06

² API RP (англ. American Petroleum Institute Recommended Practice –) – это набор руководств и передовых методов для нефтяной и газовой промышленности, устанавливающий технические требования к оборудованию, процессам и безопасности, широко используемые для повышения надёжности и гармонизации в отрасли.

³ ANSYS FEA (англ. Analysis System Finite Element Analysis – метод конечных элементов) – это комплексное инженерное программное обеспечение от компании ANSYS, использующее метод конечных элементов для виртуального моделирования и анализа поведения физических объектов, позволяя рассчитывать прочность, тепловые потоки, вибрации, гидродинамику и другие физические явления в сложных конструкциях до их физического создания.

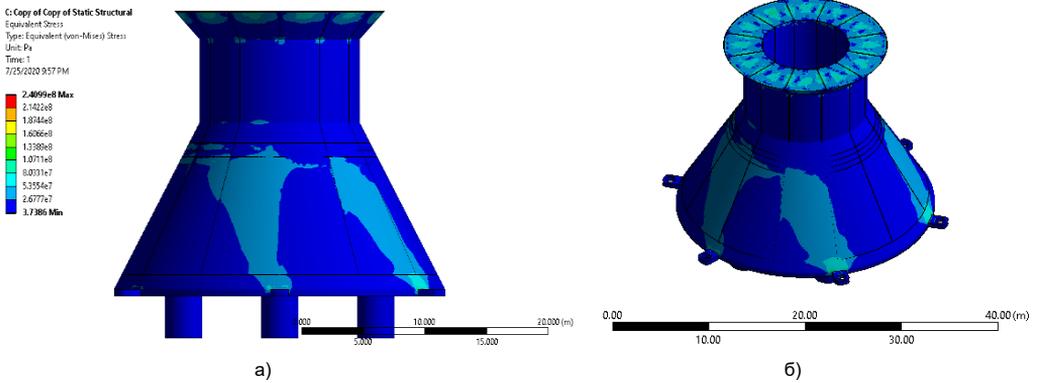


Рисунок 6. Распределение механического напряжения для платформы малой размера (максимальное напряжение 241 МПа)

Figure 6. Mechanical stress distribution for a small-sized platform (maximum stress 241 MPa)
а) вид сбоку / side view; б) изометрический вид / isometric view

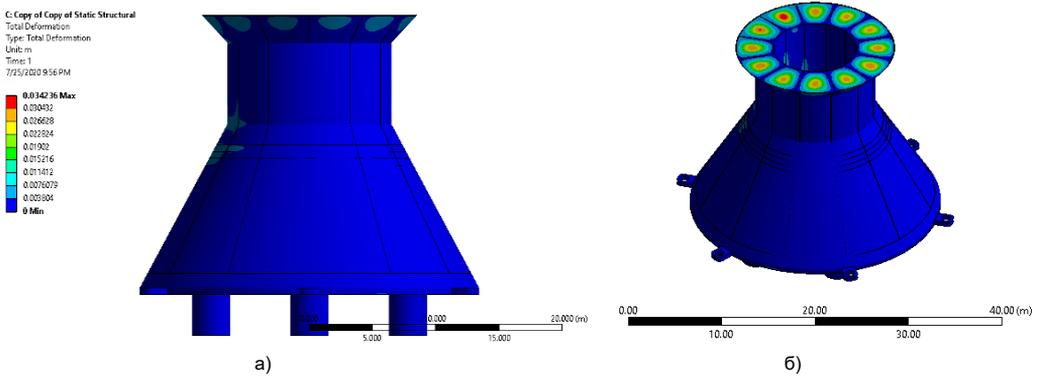


Рисунок 7. Деформация платформы минимального размера (максимальная деформация 34 мм)

Figure 7. Small-sized platform deformation (maximum deformation 34 mm)
а) вид сбоку / side view; б) изометрический вид / isometric view

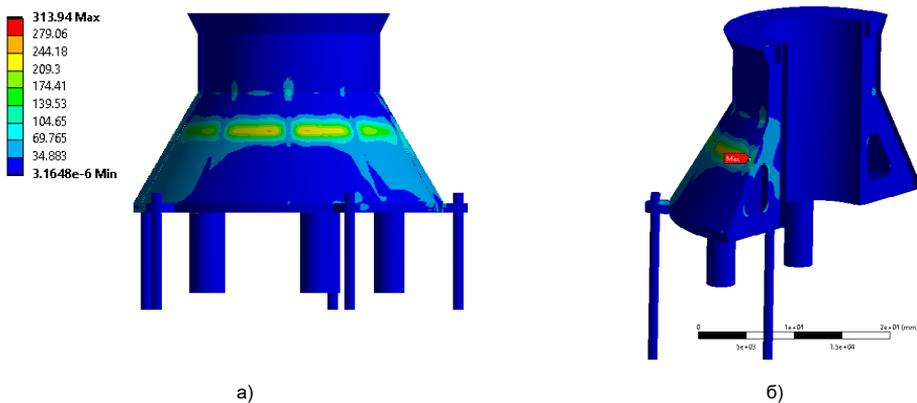


Рисунок 8. Распределение механического напряжения для платформы среднего размера (максимальное напряжение 314 МПа)

Figure 8. Mechanical stress distribution for a medium-sized platform (maximum stress 314 MPa)
а) вид сбоку / side view; б) изометрический вид в разрезе / isometric cross-sectional view

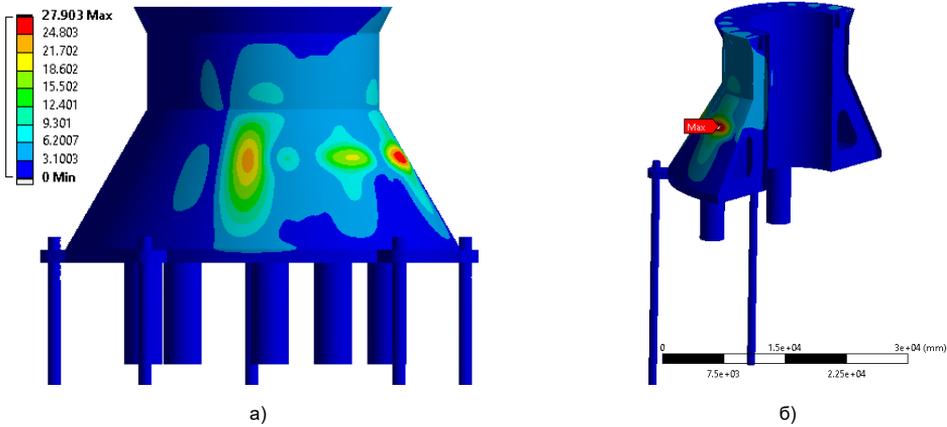


Рисунок 9. Деформация платформы среднего размера (максимальная деформация 28 мм)
Figure 9. Medium-sized platform deformation (maximum deformation 28 mm)
 а) вид сбоку / side view; б) изометрический вид в разрезе / isometric cross-sectional view

Для расчётов конструкции свай рекомендуется использовать сваи указанных размеров (табл. 6):

Таблица 6. Параметры сваи для средней платформы
Table 6. Pile design parameters for a medium-sized platform

Внешний диаметр, мм Outer diameter, mm	Толщина стенки, мм Wall thickness, mm	Длина сваи, м Pile length, m
1067	17	16

Сваи таких размеров способны выдерживать силу 7,95 МН, что явно больше максимальной силы реакции.

Большая нефтяная платформа (с диаметром горловины 15 м)

Для платформы с горловиной диаметром 15 м в программе SolidWorks⁴ и последующих модификациях общий вес конструкции составил 1576 т, включая сваи и дополнительный вес в размере 30%. Кроме того, вес верхней части оценивался в 7500 т. Ледовые нагрузки, действующие на наклонную поверхность, были следующими: горизонтальная сила (F_{Hl}) составила $4,3188 \times 10^7$ Н, а вертикальная сила (F_{Vl}) – $2,3237 \times 10^7$ Н. Результаты анализа методом конечных элементов подтвердили способность конструкции выдерживать ледовые нагрузки в данных условиях, при этом максимальное напряжение составило 317 МПа при максимальной деформации 32 мм (рис. 10–11).

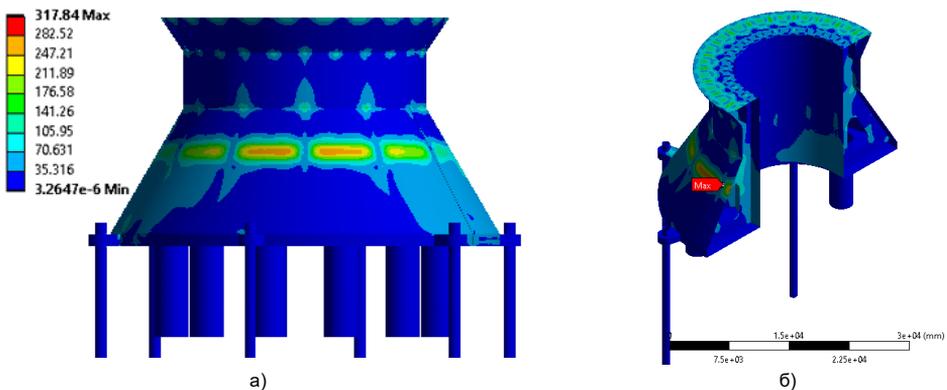


Рисунок 10. Распределение механического напряжения для платформы максимального размера (максимальное напряжение 317 МПа)
Figure 10. Mechanical stress distribution for the maximum-sized platform (maximum stress 317 MPa)
 а) вид сбоку / side view; б) изометрический вид в разрезе / isometric cross-sectional view

4 SolidWorks (от англ. solid – твёрдое тело, works – работает) – программный комплекс для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения.

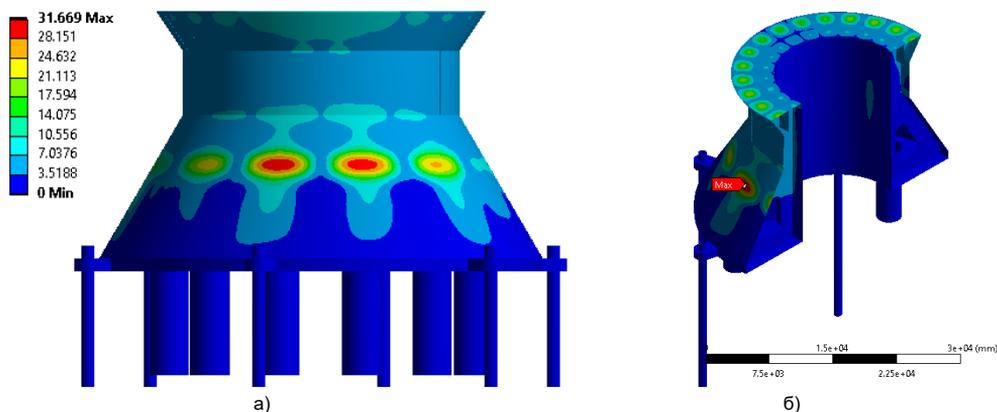


Рисунок 11. Деформация максимальной платформы (максимальная деформация 32 мм)

Figure 11. Maximum-sized platform deformation (maximum deformation 32 mm)

а) вид сбоку / side view; б) изометрический вид в разрезе / isometric cross-sectional view

Силы реакции для большой платформы следующие (табл. 7). Следовательно, согласно стандартному расчёту API RP 2A [21], для большой платформы сваи такого размера способны обеспечить достаточную устойчивость и способность выдерживать внешние нагрузки. Для расчётов конструкции сваи рекомендуется использовать сваи указанных размеров (табл. 5). Такие сваи имеют несущую способность силой 7,46 МН, что превышает максимальную силу реакции, испытываемую сваями.

Таблица 7. Несущая способность сваи для средней платформы

Table 7. Load-bearing capacity of the pile for the medium-sized platform

Номера свай Pile number	Сила реакции, Н Reaction force, N
Pile 1	7,34E+06
Pile 2	3,26E+06
Pile 3	1,87E+06
Pile 4	6,54E+06
Pile 5	5,44E+06
Pile 6	2,15E+06

Таблица 8. Параметры сваи для большой платформы

Table 8. Pile design parameters for the maximum-sized platform

Внешний диаметр, мм Outer diameter, mm	Толщина стенки, мм Wall thickness, mm	Длина сваи, м Pile length, m
1067	17	15

Ледокольная часть всех конструкций больше всего подвержена высоким нагрузкам, варьирующимся в диапазоне 200–315 МПа, которые значительно превышают допустимые значения 230 МПа. Хотелось бы отметить, что высокие нагрузки носят локальный характер, поэто-

му для исключения пластической деформации в локальных местах допустимое напряжение принимается равным пределу текучести материала 345 МПа (толщина стенки 40 мм). Таким образом, конструкция опорного основания платформы считается приемлемой. Полое пространство ледокольных конструкций заполняется песком для упрочнения конструкций и увеличения стабильности на морском дне. Эффект влияния песка на прочность не был включен в данный расчёт, поэтому при более детальном рассмотрении прочность конструкций будет намного выше допустимого значения 345 МПа. Подобно максимальным нагрузкам, деформация во всех платформах носит локальный характер, и никаких нарушений стабильности платформы не обнаружено. Локальные деформации 34 мм (минимальный размер), 28 мм (средний размер) и 32 мм (максимальный размер) не критичны и могут быть нивелированы за счёт упрочнения рёбрами жёсткости в этих местах и песочной смесью внутри ледокольной конструкции.

Заключение

В ходе данного исследования была изучена новая концепция автономных нефтяных платформ различных размеров – малых (с диаметром горловины 9 м), средних (с диаметром горловины 12 м) и больших (с диаметром горловины 15 м), предназначенных для использования на Северном Каспии. Несмотря на то, что концепция автономных нефтяных платформ широко известна в нефтегазовой промышленности, она ещё не применялась в казахстанском секторе Каспийского моря. Такие платформы могут быть полезны для добычи трудноизвлекаемых запасов в Северо-Каспийском регионе в условиях льда. Одной из ключевых особенностей новой концепции является применение всасывающих оснований в дополнение к обычным сваям,

что может повысить устойчивость платформы. В рамках исследования был проведен расчёт веса платформ и ледовых нагрузок с использованием ISO 19906:2019 [19]. Анализ методом конечных элементов показал, что такие конструкции способны выдерживать нагрузки, вызванные ледовыми глыбами, за исключением некоторых экстремальных локальных воздействий, которые

могут быть легко скорректированы. Деформации таких конструкций также находятся в пределах допустимых значений. Кроме того, для каждой платформы были проведены расчёты конструкций свай. Предлагаемая новая концепция автономных нефтяных платформ может представлять собой инновационное решение для работы в ледовых условиях Северо-Каспийского региона.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Альжанов Н.К. – сбор, анализ, проведение исследования, написание рукописи, интерпретация данных исследования, проверка результатов; Тлешев М.Т. – интерпретация данных, проверка результатов; концепция исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.”

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. The greatest contribution is distributed as follows: Nursultan K. Alzhanov – data collection, analysis, conduct of the study, manuscript writing, interpretation of the study data, and verification of the results; Maxat T. Tleshev – interpretation of the data, verification of the results, and study concept.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. bellona.org [интернет]. Bellona Foundation Chapter 1: Oil and gas resources on the Arctic continental shelf in Russia [дата обращения 22.06.2022]. Доступ по ссылке: bellona.org/assets/fil_Chapter_1_Oil_and_gas_resources_on_the_Arctic_Continental_shelf_in_Russia.pdf.
2. Лаверов Н.П., Дмитриевский А.Н., Богоявленский В.И. Фундаментальные аспекты освоения нефтегазовых ресурсов арктического шельфа России // Арктика. Экология и экономика. 2011. №1(1). С. 26–37.
3. em.construction [интернет]. EMC. Fixed Offshore Ice-resistant Off-loading Terminal Varandey, Lukoil [дата обращения 29.06.2022]. Доступ по ссылке: em.construction/en/Lukoil.php.
4. trans.lukoil.ru [интернет]. ООО «ЛУКОЙЛ-Транс». Варандейский терминал [дата обращения 29.06.2022]. Доступ по ссылке: trans.lukoil.ru/ru/About/Structure/VarandeyTerminal.
5. Zhang D., Wang G., Yue Q. Evaluation of ice-induced fatigue life for a vertical offshore structure in the Bohai Sea // Cold Reg. Sci. Technol. 2018. Vol. 154. P. 103–110. doi: [10.1016/j.coldregions.2018.05.012](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.05.012).
6. lukoil.ru [интернет]. Лукойл. Месторождение им. В. Филановского [дата обращения 29.06.2022]. Доступ по ссылке: lukoil.ru/Business/Upstream/KeyProjects/Filanovskyfield.
7. Masterson D.M., Bruce J.C., Sisodiya R., Maddock W. Beaufort Sea exploration: past and future // Offshore Technology Conference; May 6–9, 1991; Houston, Texas. Available from: onepetro.org/OTCONF/proceedings-abstract/91OTC/91OTC/OTC-6530-MS/41339.
8. Callow L. (LTLC Consulting in association with Salmo Consulting Inc.). Oil and Gas Exploration & Development Activity Forecast Canadian Beaufort Sea 2012 – 2027. Canada; 2012 Apr.
9. Li G., Zhang D., Yue Q. Life-cycle cost-effective optimum design of ice-resistant offshore platforms // J. Offshore Mech. Arct. Eng. 2009. Vol. 133. Issue 3. doi: [10.1115/1.3124138](https://doi.org/10.1115/1.3124138).
10. Zhang D., Yue Q. Major challenges of offshore platforms design for shallow water oil and gas field in moderate ice conditions // Ocean Engineering. 2011. Vol. 38, Issue 10. P. 1220–1224. doi: [10.1016/j.oceaneng.2011.05.012](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.05.012).
11. Boiko A.Y. Offshore ice-resistant fixed platform for the Dolginskoye field in the Pechora Sea : dissertation. Stavanger: University of Stavanger, 2014.
12. Bychkov D.A. Offshore Ice-Resistant Fixed Platform Pirazlomnaya // Problems of Geology and Subsurface Development, Part II; Apr 4–8, 2016; Tomsk, Russia. Available from: portal.tpu.ru/files/conferences/usovma/2016/vol2_2016.pdf.
13. Sharapov D. Ice Factors Overview for Offshore Platforms // Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Civil Engineering and Smart Structures; Nov 25–26, 2023; Chengdu, China. Available from: link.springer.com/book/10.1007/978-981-97-1514-5.

14. Du X., Cui Y., Liu Y. The Research and Application of the Ice-Resistant Technology for the Offshore Structures in Bohai Sea Available to Purchase // ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering; May 31 – June 5, 2015; St. John's, Newfoundland, Canada. Available from: asmedigitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings-abstract/OMAE2015/56567/V008T07A036/289657.
15. Korneeva Ya.A. Risk factors for Oil and Gas Workers on the Offshore Ice-Resistant Platform in the Caspian Sea // SPE Annual Caspian Technical Conference; Oct 21–22, 2020; Virtual. Available from: onepetro.org/SPECTCE/proceedings-abstract/20CTC/20CTC/D023S013R007/449741.
16. orsted.com [Internet]. Ørsted's experience with suction bucket jackets [cited 2022 Jul 9]. Available from: orsted.com/en/what-we-do/renewable-energy-solutions/offshore-wind/technology/suction-bucket-jacket-foundations.
17. Pretlove J., Royston S. Towards autonomous operations // Offshore Technology Conference; May 1–4, 2023; Houston, Texas, USA [cited 2022 Jul 9]. Available from: onepetro.org/OTCONF/proceedings-abstract/23OTC/23OTC/D041S054R006/519222.
18. ABB. Energy transition equation: Offshore oil & gas: Minimizing emissions on the journey towards autonomous operations. 2022. Report No.: 4JZZ000395enA.
19. iso.org [Интернет]. ISO 19906:2019. Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures. 2nd ed. [дата обращения 13.07.2022]. Доступ по ссылке: www.iso.org/standard/65477.html.
20. Davenport G.F., Runge K.H., Murff J.D., inventors; ExxonMobil Upstream Research Co, assignee. Offshore caisson having upper and lower sections separated by a structural diaphragm and method of installing the same. United States patent US 6371695B1. 2002 Apr 16.
21. api.org [Интернет]. American Petroleum Institute. RP 2A-WSD: Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms—Working stress design (22nd ed.) [дата обращения 15.07.2022]. Доступ по ссылке: publications.api.org.

REFERENCES

1. bellona.org [Internet]. Bellona Foundation Chapter 1: Oil and gas resources on the Arctic continental shelf in Russia [cited 2022 Jun 22]. Available from: bellona.org/assets/fil_Chapter_1_Oil_and_gas_resources_on_the_Arctic_continental_shelf_in_Russia.pdf.
2. Laverov NP, Dmitrievskii AA, Bogoyavlensky VI. Fundamental aspects of the development of oil and gas resources of the Russian Arctic shelf. *Arctic: ecology and economy*. 2011(1(1)):26–37. (In Russ).
3. em.construction [Internet]. EMC. Fixed Offshore Ice-resistant Off-loading Terminal Varandey, Lukoil [cited 2022 Jun 22]. Available from: em.construction/en/Lukoil.php.
4. trans.lukoil.ru [Internet]. LUKOIL-TRANS. Terminal Varandey [cited 2022 Jun 22]. Available from: trans.lukoil.ru/ru/About/Structure/VarandeyTerminal. (In Russ).
5. Zhang D, Wang G, Yue Q. Evaluation of ice-induced fatigue life for a vertical offshore structure in the Bohai Sea. *Col'd Reg. Sci. Technol*. 2018;154:103–110. doi: [10.1016/j.coldregions.2018.05.012](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.05.012).
6. lukoil.ru [Internet]. LUKOIL. Filanovsky Field [cited 2022 Jun 22]. Available from: lukoil.ru/Business/Upstream/KeyProjects/Filanovskyfield.
7. Masterson DM, Bruce JC, Sisodiya R, Maddock W. Beaufort Sea exploration: past and future. Offshore Technology Conference; 1991 May 6–9; Houston, Texas. Available from: onepetro.org/OTCONF/proceedings-abstract/91OTC/91OTC/OTC-6530-MS/41339.
8. Callow L. (LTLC Consulting in association with Salmo Consulting Inc.). Oil and Gas Exploration & Development Activity Forecast Canadian Beaufort Sea 2012 – 2027. Canada; 2012 Apr.
9. Li G, Zhang D, Yue Q. Life-cycle cost-effective optimum design of ice-resistant offshore platforms. *J. Offshore Mech. Arct. Eng*. 2009;133(3):031501. doi: [10.1115/1.3124138](https://doi.org/10.1115/1.3124138).
10. Zhang D, Yue Q. Major challenges of offshore platforms design for shallow water oil and gas field in moderate ice conditions. *Ocean Engineering*. 2011;38(10):1220–1224. doi: [10.1016/j.oceaneng.2011.05.012](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.05.012).
11. Boiko AY. Offshore ice-resistant fixed platform for the Dolginskoye field in the Pechora Sea [dissertation]. Stavanger: University of Stavanger; 2014.
12. Bychkov DA. Offshore Ice-Resistant Fixed Platform Prirazlomnaya. Problems of Geology and Subsurface Development, Part II; 2016 Apr 4–8; Tomsk, Russia. Available from: portal.tpu.ru/files/conferences/usovma/2016/vol2_2016.pdf.
13. Sharapov D. Ice Factors Overview for Offshore Platforms. Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Civil Engineering and Smart Structures; 2023 Nov 25–26; Chengdu, China. Available from: link.springer.com/book/10.1007/978-981-97-1514-5.
14. Du X, Cui Y, Liu Y. The Research and Application of the Ice-Resistant Technology for the Offshore Structures in Bohai Sea Available to Purchase. ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering; 2015 May 31 – June 5; St. John's, Newfoundland, Canada. Available from: asmedigitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings-abstract/OMAE2015/56567/V008T07A036/289657.
15. Korneeva YA. Risk factors for Oil and Gas Workers on the Offshore Ice-Resistant Platform in the Caspian Sea // SPE Annual Caspian Technical Conference; 2020 Oct 21–22; Virtual. Available from: onepetro.org/SPECTCE/proceedings-abstract/20CTC/20CTC/D023S013R007/449741.
16. orsted.com [Internet]. Ørsted's experience with suction bucket jackets [cited 2022 Jul 9]. Available from: orsted.com/en/what-we-do/renewable-energy-solutions/offshore-wind/technology/suction-bucket-jacket-foundations.
17. Pretlove J, Royston S. Towards autonomous operations. Offshore Technology Conference; May 1–4, 2023; Houston, Texas, USA. Available from: onepetro.org/OTCONF/proceedings-abstract/23OTC/23OTC/D041S054R006/519222.
18. ABB. Energy transition equation: Offshore oil & gas: Minimizing emissions on the journey towards autonomous operations. 2022. Report No.: 4JZZ000395enA.
19. iso.org [Internet]. ISO 19906:2019. Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures. 2nd ed. [cited 2022 Jul 13]. Available from: www.iso.org/standard/65477.html.
20. Davenport GF, Runge KH, Murff JD, inventors; ExxonMobil Upstream Research Co, assignee. Offshore caisson having upper and lower sections separated by a structural diaphragm and method of installing the same. United States patent US 6371695B1. 2002 Apr 16.

21. api.org [Internet]. American Petroleum Institute. RP 2A-WSD: Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms-Working stress design (22nd ed.) [cited 2022 Jul 15]. Available from: publications.api.org.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ***Альжанов Нурсултан Коныспаевич**

PhD

ORCID [0000-0001-9348-884X](https://orcid.org/0000-0001-9348-884X)e-mail: n.alzhanov@kmge.kz.**Тлешев Максат Тлешевич**ORCID [0000-0003-4713-9491](https://orcid.org/0000-0003-4713-9491)e-mail: m.tleshev@kmge.kz.**AUTHORS' INFO*****Nursultan K. Alzhanov**

PhD

ORCID [0000-0001-9348-884X](https://orcid.org/0000-0001-9348-884X)e-mail: n.alzhanov@kmge.kz.**Maxat T. Tleshev**ORCID [0000-0003-4713-9491](https://orcid.org/0000-0003-4713-9491)e-mail: m.tleshev@kmge.kz.

*Автор, ответственный за переписку / Corresponding Author