

Гоманков В.А., студент
6 курс, Департамент морских арктических технологий
Дальневосточный федеральный университет;
Владивосток, Россия

Шмыков А.А., старший преподаватель
Департамент морских арктических технологий
Дальневосточный федеральный университет;
Владивосток, Россия

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ РАЗДЕЛЯЕМОЙ БУРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ «ТЮЛЕНЬ» ДЛЯ РАЗВЕДКИ В УСЛОВИЯХ КАРСКОГО МОРЯ

***Аннотация:** В статье представлена инновационная бионическая концепция разделяемой двухкомпонентной буровой системы «Тюлень», предназначенной для разведочного бурения на арктическом шельфе. В работе представлены архитектурные решения, обоснование выбора ключевых элементов, включая вакуумные кессоны и уникальный стыковочный узел «нога-паз», а также результаты оценки основных нагрузок и напряженно-деформированного состояния. Предложенная концепция позволяет значительно расширить навигационный период для разведочного бурения, обеспечивая высокий уровень безопасности и экологичности.*

***Ключевые слова:** арктический шельф, Карское море, разведочное бурение, мобильная ледостойкая платформа, бионическое проектирование, гравитационное основание, вакуумный кессон, СПБУ, разделяемая система, ледовая нагрузка.*

*Gomankov V.A., student
6th year, Department of Marine Arctic Technologies
Far Eastern Federal University;
Vladivostok, Russia*

*Shmykov A.A., senior lecturer
Department of Marine Arctic Technologies
Far Eastern Federal University;
Vladivostok, Russia*

CONCEPTUAL DESIGN OF THE "SEAL" SPLIT DRILLING PLATFORM FOR EXPLORATION IN THE KARA SEA CONDITIONS

***Abstract:** The paper presents an innovative biomimetic concept of the "Seal" split two-component drilling system designed for exploration drilling on the Arctic shelf. The architectural solutions are presented, along with the justification for the selection of key elements, including vacuum caissons and the unique "leg-groove" docking unit, as well as the results of the assessment of the main loads and the stress-strain state. The proposed concept significantly extends the navigation period for exploration drilling, ensuring a high level of safety and environmental friendliness [1–7].*

***Keywords:** Arctic shelf, Kara Sea, exploration drilling, mobile ice-resistant platform, biomimetic design, gravity foundation, vacuum caisson, jack-up rig, split system, ice load.*

Введение

Освоение углеводородных ресурсов арктического шельфа является приоритетной задачей для обеспечения энергетической безопасности Российской Федерации. Наиболее перспективными, но и наиболее сложными в инженерном отношении, являются районы с экстремальными ледовыми

условиями, такие как акватория Карского моря. Здесь сосредоточена значительная доля прогнозных ресурсов, однако проведение геологоразведочных работ сопряжено с высокими рисками [1, 2]. Существующие технические решения для разведочного бурения, как правило, являются либо узкоспециализированными (стационарные платформы), либо ограниченными по условиям эксплуатации (самоподъемные и полупогружные установки) [3]. Ключевая проблема арктической геологоразведки — противоречие между необходимостью иметь массивную, устойчивую к ледовым нагрузкам платформу и требованием к её высокой мобильности для оперативного перехода на новые участки [4].

Цель данной работы — разработка и обоснование концептуального проекта мобильной буровой разведочной платформы, способной эффективно и безопасно работать в условиях дрейфующих льдов и торосов на глубинах до 50 метров, характерных для Кропоткинского месторождения Карского моря.

При выборе расчетной точки для проектирования принят консервативный подход: из всего диапазона глубин (25–50 м) и грунтовых условий акватории Карского моря выбрана наиболее неблагоприятная комбинация факторов (Рис. 1). Расчетная точка характеризуется максимальной глубиной (50 м), наличием слабых глинистых и илистых грунтов в верхней части разреза (ИГЭ-1, ИГЭ-2), а также экстремальными ледовыми и волновыми нагрузками, характерными для северо-восточной части моря [1, 15]. Такой подход гарантирует, что принятые конструктивные решения обеспечивают необходимый запас прочности и устойчивости для всего района возможной эксплуатации, обозначенного на карте-схеме (Рис. 1). Таким образом, платформа может быть использована в широком диапазоне условий без необходимости корректировки фундамента или изменения основных параметров.

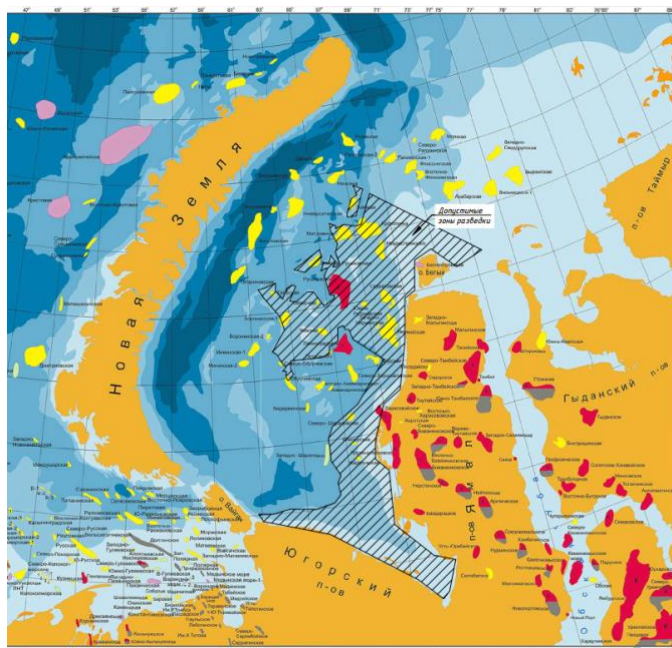


Рисунок 1. Карта-схема района эксплуатации платформы «Тюлень» в акватории Карского моря

1 Бионическая аналогия: поведение тюленя как инженерная концепция

При разработке концепции платформы за основу принят уникальный механизм выживания ластоногих — в частности, кольчатой нерпы и гренландского тюленя, — обитающих в арктических морях. Ключевая поведенческая стратегия этих животных при возникновении угрозы (например, при появлении косатки или полярного медведя) заключается в экстренном выходе на лед. В этом процессе можно выделить три фазы, имеющие прямую инженерную аналогию с проектируемой системой (Рис. 2).

Фаза 1 — «Укрытие на льду». Тюлень, чувствуя опасность в воде, стремится выбраться на ледовое поле. Лед, неподвижный и прочный, становится для него безопасной платформой. В нашей системе эту функцию выполняет гравитационно-кессонный фундамент (ГКФ). Он является «пассивным льдом» — стационарным, массивным, абсолютно устойчивым к внешним воздействиям. Вся разрушительная энергия волн и дрейфующих льдов, подобно ударам касаток, принимается на себя этим массивным основанием, а не на уязвимый корпус буровой установки.

Фаза 2 — «Безопасная высота». Выбравшись на лед, тюлень оказывается вне досягаемости водных хищников. Он поднимается над уровнем воды, выходя из агрессивной среды. Аналогичным образом, мобильная самоподъемная буровая установка (СПБУ) после стыковки с фундаментом с помощью своих опорных механизмов поднимает корпус над уровнем моря. Это выводит её из зоны действия ледовых полей, торосов и штормовых волн. Буровая вышка и технологическое оборудование оказываются в «безопасной надледной зоне», где воздействие волн и льда минимально.

Фаза 3 — «Мобильность и возвратность». Тюлень не привязан к одному месту — он может покинуть лед, когда опасность минует, и вернуться в воду для охоты или перехода на новую территорию. Эта способность к многократному переходу между средами реализована в системе через обратимость стыковки. ГКФ остается на дне как постоянная станция, а СПБУ, после завершения бурения, отстыковывается, опускается на воду и с минимальными затратами времени буксируется к следующему фундаменту. При возвращении на точку бурения цикл повторяется. Это позволяет кардинально сократить время между бурением скважин на разных участках, что критически важно в условиях короткого навигационного окна Арктики.

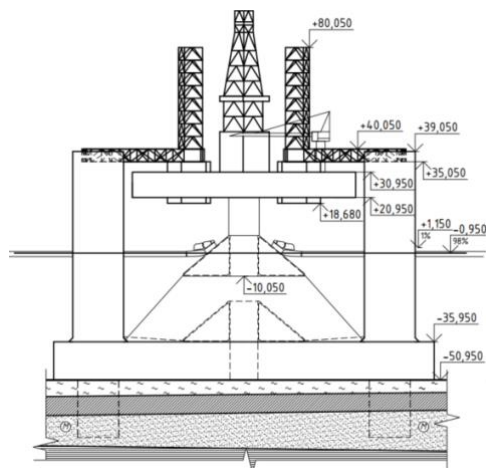


Рисунок 2. Бионическая аналогия и схема эксплуатации системы «Тюлень»: а) тюлень на льду — укрытие от хищников; б) СПБУ на ГКФ — укрытие от ледовых и волновых нагрузок (фазы 1-5).

Таким образом, предложенная бионическая концепция переводит арктическое бурение на новый уровень безопасности и эффективности. Вместо того чтобы создавать одну сверхпрочную и сверхтяжелую платформу, неспособную к быстрому перемещению, мы создаем систему из двух элементов, каждый из которых идеально выполняет свою функцию, подобно тому, как лед и тюлень существуют в гармоничном симбиозе.

2 Определение предельных габаритов сооружения

На начальном этапе проектирования выполнен анализ производственных и эксплуатационных ограничений, определяющих максимально допустимые габиты платформы. Ключевыми факторами, лимитирующими размеры сооружения, являются:

Ограничения сухого дока. В качестве базовой производственной площадки для изготовления гравитационного основания рассмотрен Центр

строительства крупнотоннажных морских сооружений (ЦСКМС) «Белокаменка» (Мурманская область). Сухой док №1 имеет габаритные размеры 400×175 м. С учетом требований ГОСТ Р 58772-2019 к килевому зазору (не менее 0,5–1,0 м), необходимости размещения строительных лесов, проходов для персонала и работы грузоподъемной техники, суммарный боковой зазор с каждого борта составляет 5–7 метров [5]. Таким образом, максимальная ширина платформы не должна превышать 163–165 м, длина — 350–360 м, а осадка при выводе из дока — 13,5–14,0 м.

Ограничения по заводу СПБУ в межколонное пространство. Для обеспечения безопасного захода и позиционирования самоподъемной буровой установки внутри опорных колонн фундамента выполнен расчет минимальных навигационных зазоров. На основе анализа габаритов СПБУ «Кольская» (ширина корпуса 80 м) и требований международных руководств (IADC) к зазорам при позиционировании (3,0 м в штиль, 5,0 м при волнении), с учетом ледового запаса (1,0–1,5 м) и запаса на отклонение при буксировке, минимальное расстояние между внутренними гранями колонн определено в 95 м [6]. Принимаемое в проекте расстояние 105 м (между осями колонн — 120 м) обеспечивает двукратный запас по сравнению с минимальными требованиями.

На основе выполненного анализа рекомендованные и реализованные в проекте габариты платформы (длина 150 м, ширина 150 м, расстояние между осями колонн 120 м) обеспечивают технологический запас 10–15% относительно предельно возможных значений, что является общепринятой инженерной практикой для сооружений I класса ответственности [7].

3 Технология установки платформы

Процесс установки системы «Тюлень» на точку бурения представляет собой последовательный пятиэтапный цикл, выполняемый с учетом гидрометеорологических и ледовых условий (Рис. 2, 3) [8, 9].

Этап 1 – Позиционирование и балластировка ГКФ. Гравитационно-кессонный фундамент транспортируется к месту бурения буксирами в

плавающим состоянии (осадка в транспортном положении составляет 9,65 м). С помощью системы навигационного позиционирования (дифференциальная GPS, гидроакустические маяки) ГКФ выводится в заданную точку с точностью ± 3 м. Затем начинается контролируемая балластировка отсеков фундамента морской водой. Погружение осуществляется со скоростью не более 0,5 м/мин для предотвращения динамических ударов о дно и обеспечения равномерной посадки. После касания опорной плитой поверхности дна производится выверка горизонтальности с использованием прецизионных инклинометров. Допустимый крен на этом этапе не превышает $0,5^\circ$ [5].

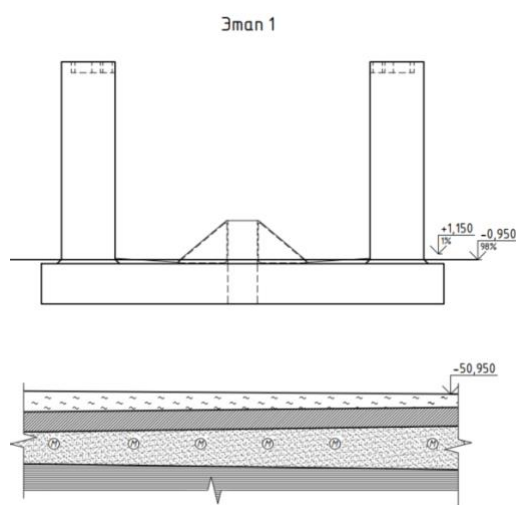


Рисунок 3 – Этап 1: позиционирование и балластировка ГКФ над точкой установки.

Этап 2 – Погружение на дно и вдавливание кессонов. После фиксации ГКФ на грунте приступают к операции вдавливания вакуумных кессонов. В каждой из четырех колонн размещена домкратная система, состоящая из 8 гидравлических домкратов усилием 3000 кН каждый (суммарное усилие на кессон — 24 МН). Домкраты, опираясь на оголовки колонны, последовательно вдавливают стальной кессон диаметром 16,2 м в донный грунт на проектную глубину 22,6 м (из которых 3 м — заглубление стальной юбки, 19,6 м — погружение цилиндрической обечайки) [10, 11]. Процесс вдавливания контролируется системой синхронизации, отслеживающей усилие на каждом домкрате с точностью $\pm 2,5\%$ и вертикальность погружения с точностью $\pm 0,05^\circ$. Давление вдавливания на этом этапе составляет не менее 16 МН на

кессон. После достижения проектной глубины из внутренней полости кессона с помощью высокопроизводительных вакуумных насосов откачивается вода. Создаваемое разрежение обеспечивает перепад давления до 80–90 кПа. Под действием этого перепада и сил трения по боковой поверхности кессон дополнительно заглубляется на 0,5–1,0 м, создавая несущую способность, эквивалентную забивной свае-оболочке диаметром 16 м. Коэффициент безопасности по удерживающей способности на этом этапе составляет не менее 2,5 [12].

Этап 2

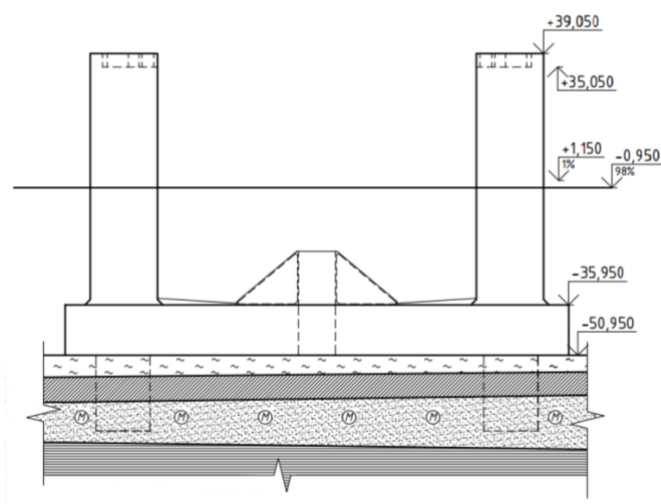


Рисунок 4. Этап 2: погружение ГКФ на дно и вдавливание вакуумных кессонов.

Этап 3 – Доставка СПБУ. Мобильная самоподъемная буровая установка (СПБУ) буксируется к месту установки ГКФ в межсезонный период (при отсутствии сплошного ледяного покрова). Транспортировка осуществляется на буксире при благоприятном прогнозе погоды (волнение не более 3 баллов, скорость ветра не более 15 м/с). СПБУ ледового класса Arc4 способна самостоятельно маневрировать в битом льду толщиной до 0,7 м, что позволяет осуществлять доставку в условиях начального ледообразования [13].

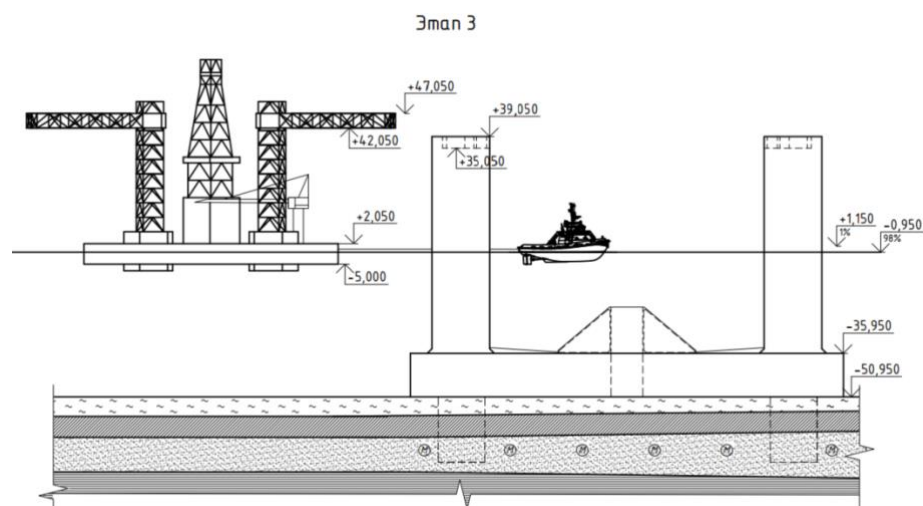


Рисунок 5. Этап 3: доставка СПБУ к месту установки.

Этап 4 – Позиционирование и установка СПБУ. Завод СПБУ в межколонное пространство осуществляется на буксире при скорости не более 0,5 узла (0,25 м/с). С помощью V-образных ловителей на оголовках колонн ГКФ производится первичное центрирование опорных ног («лап») СПБУ. При допустимом начальном промахе до 0,5 м система самоцентрирования обеспечивает точную посадку с погрешностью не более ± 50 мм [14]. После замыкания замковых элементов (rack chock assembly) СПБУ с помощью собственной реечно-шестеренчатой подъемной системы поднимает корпус над уровнем моря на высоту, обеспечивающую воздушный зазор не менее 17 м от расчетного уровня воды. Это гарантирует нахождение корпуса СПБУ вне зоны воздействия волн высотой до 13,5 м и ледовых полей толщиной до 2,0 м [15].

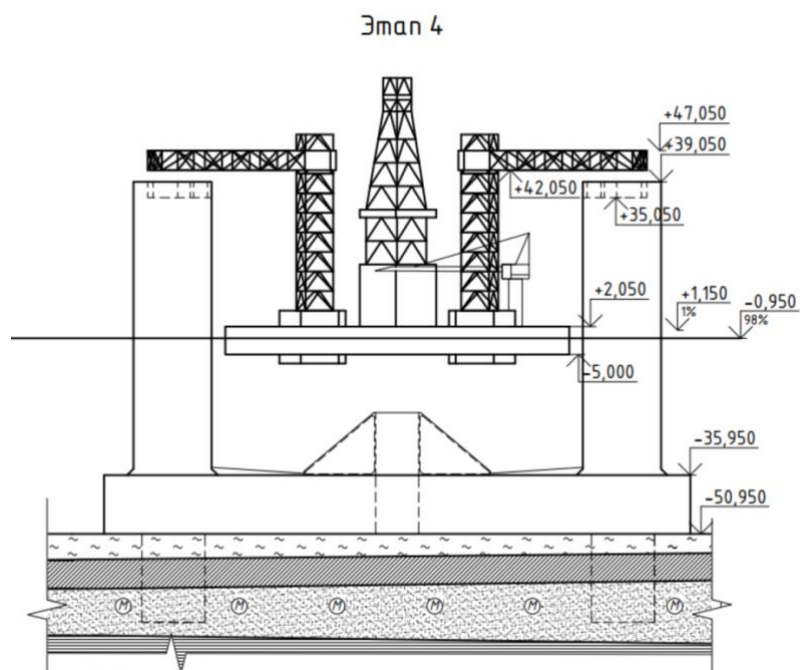


Рисунок 6. Этап 4: позиционирование и установка СПБУ на ГКФ.

Этап 5 – Эксплуатация. Система переходит в рабочее состояние. СПБУ, жестко зафиксированная на ГКФ, выполняет разведочное бурение скважин через центральную шахту. Вся ледовая и волновая нагрузка воспринимается массивным фундаментом и передается на грунтовое основание. После завершения бурения на данной точке цикл может быть повторен: СПБУ отсоединяется и буксируется к следующему фундаменту, а ГКФ остается на месте для возможного использования в качестве основания для добычной платформы или кондуктора для якорения других плавучих объектов [16].

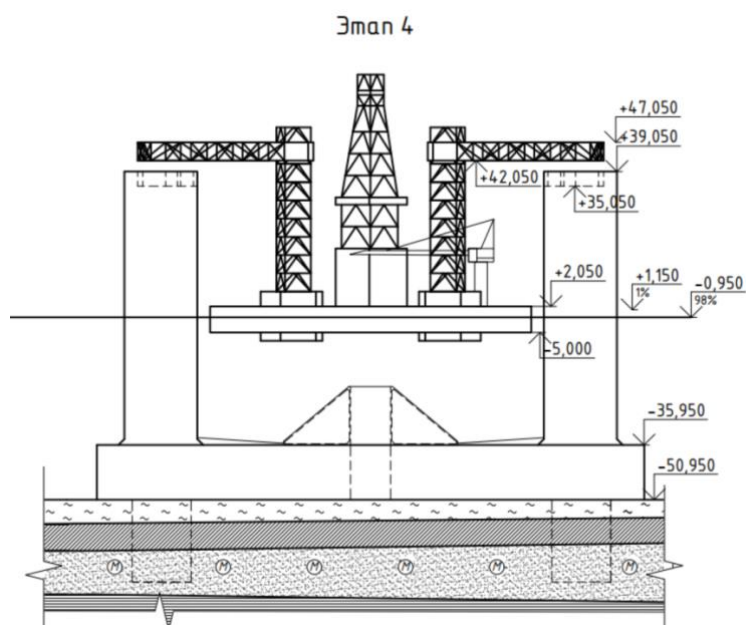


Рисунок 7. Этап 5: эксплуатационное состояние системы.

4 Концепция разделяемой системы

В основу проекта положена идея разделения функций [3, 8]. Предложенная система «Тюлень» состоит из двух независимых архитектурных сущностей, объединяемых только на время бурения.

Гравитационно-кессонный фундамент (ГКФ). Является пассивным, стационарным элементом, обеспечивающим ледостойкость и устойчивость. Это массивная железобетонная конструкция с четырьмя колоннами, объединенными опорной плитой размером 150×150 м (Рис. 8). Внутри каждой колонны размещаются вакуумные кессоны. После установки фундамента на точку бурения кессоны задавливаются в грунт мощными домкратами (усилие до 16 МН на кессон), а из их полости откачивается вода. Создаваемый перепад давления и сопротивление грунта по боковой поверхности обеспечивают колоссальную удерживающую силу, сравнимую с заглублением в грунт на десятки метров. Для демобилизации кессоны продуваются воздухом, что делает систему полностью обратимой [9]. Внешние грани колонн оборудованы пазами — механическим интерфейсом для приема СПБУ.

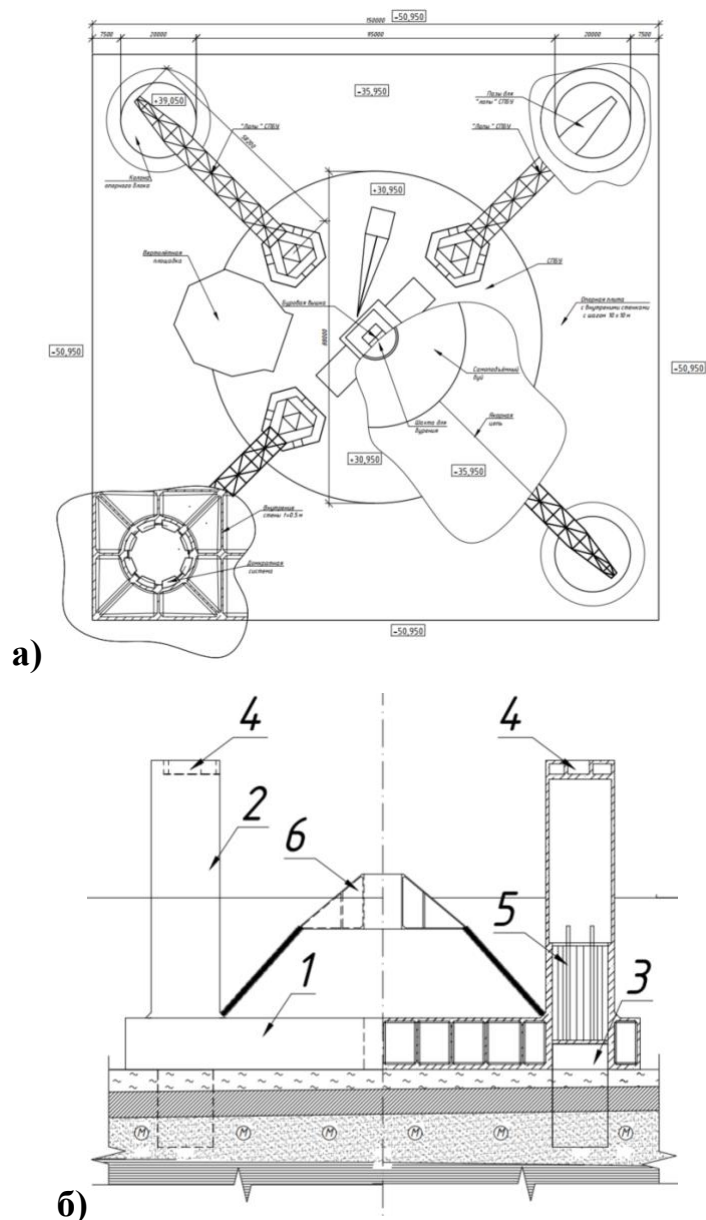


Рисунок 8 – Конструктивная схема ГКФ: а) план; и б) совмещённый фасад и разрез по колонне: 1 – опорная плита; 2 – колонна; 3 – вакуумный кессон; 4 – стыковочный паз; 5 – домкратная система; 6 – самоподъёмный буй.

Мобильная самоподъемная буровая установка (СПБУ). Является активным, транспортабельным элементом. В качестве прототипа выбрана установка «Арктическая» (проект 15402М) ледового класса Arc4, способная к маневрированию в битом льду [13]. Ключевая инновация — опорные ноги («лапы») СПБУ оснащаются не традиционными башмаками, а специальными замковыми элементами, сопрягаемыми с V-образными пазами колонн ГКФ. Это обеспечивает самоцентрирование и высокую точность посадки даже при

волнении и ограниченной видимости. После стыковки СПБУ с помощью подъемных механизмов поднимает свой корпус над уровнем моря, выводя его из зоны воздействия льда и волн. Таким образом, вся разрушительная энергия льда принимается на себя массивным фундаментом [14].

Защита буровой скважины с помощью самоподъемного буйа. Критически важным элементом обеспечения безопасности буровой скважины в период отсутствия СПБУ на точке (например, при вынужденном уходе из-за ледовой обстановки или при перебазировке) является самоподъемный металлический буй, устанавливаемый в центральную шахту ГКФ.

5 Обоснование конструктивных решений

Разработанная архитектура опирается на апробированные мировые решения, адаптированные для новых условий (Табл. 1) [4, 17, 18]. Железобетонный фундамент с вакуумными кессонами гарантирует устойчивость на слабых донных грунтах без трудоемких свайных работ. Стыковочный узел, реализованный по принципу rack chock assembly, обеспечивает жесткую безззорную фиксацию и передачу нагрузок от СПБУ на фундамент без внесения изгибающих моментов, что критично для усталостной прочности [19].

Таблица 1.

Основные параметры платформы «Тюлень»

Подсистема	Параметр	Значение
ГКФ — опорная плита	Длина плиты	150 м
	Ширина плиты	150 м
	Высота плиты	15 м
	Масса плиты	195 871 т
ГКФ — колонны	Количество колонн	4
	Высота колонн	75 м
	Поперечный размер колонны	20 м

Подсистема	Параметр	Значение
ГКФ — кессоны	Количество кессонов	4
	Диаметр кессона	16.2 м
	Длина кессона	30 м
	Усилие вдавливания	16 055 кН
ГКФ — стыковочный паз	Размеры сечения паза	17,7 × 6,2 м
	Тип / аналог	«Арктическая», пр. 15402М
СПБУ (мобильный модуль)	Длина корпуса	85 м
	Ширина корпуса	85 м
	Водоизмещение	370 т
	Ледовый класс	Ice-Resistance
	Глубина установки	50 м
Система в сборе	Общая высота сооружения	90 м

6 Определение расчетных нагрузок по СП 38.13330.2018

Расчет сооружения выполнялся для наиболее неблагоприятных сочетаний нагрузок согласно требованиям СП 38.13330.2018 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» [15]. Для сооружений I класса ответственности приняты следующие расчетные характеристики: шторм повторяемостью 1 раз в 100 лет, обеспеченность высот волн 1%, ледовая нагрузка с обеспеченностью 1%.

6.1 Определение волновой нагрузки.

Расчет волновой нагрузки на вертикальную обтекаемую преграду (колонну диаметром 20 м) выполнен согласно Приложению Е СП 38.13330.2018. Исходные данные для расчета: глубина моря $d=50$ м, высота волны $h=13,5$ м, длина волны $\lambda=178$ м, период волны $T=11,8$ с.

Результаты расчета волновой нагрузки в зависимости от положения колонны относительно профиля волны (координата $\varepsilon = x/\lambda$) представлены на Рис. 9. Максимальная нагрузка на одну колонну достигает 42,7 МН при $\varepsilon = 0,15$ (гребень волны).

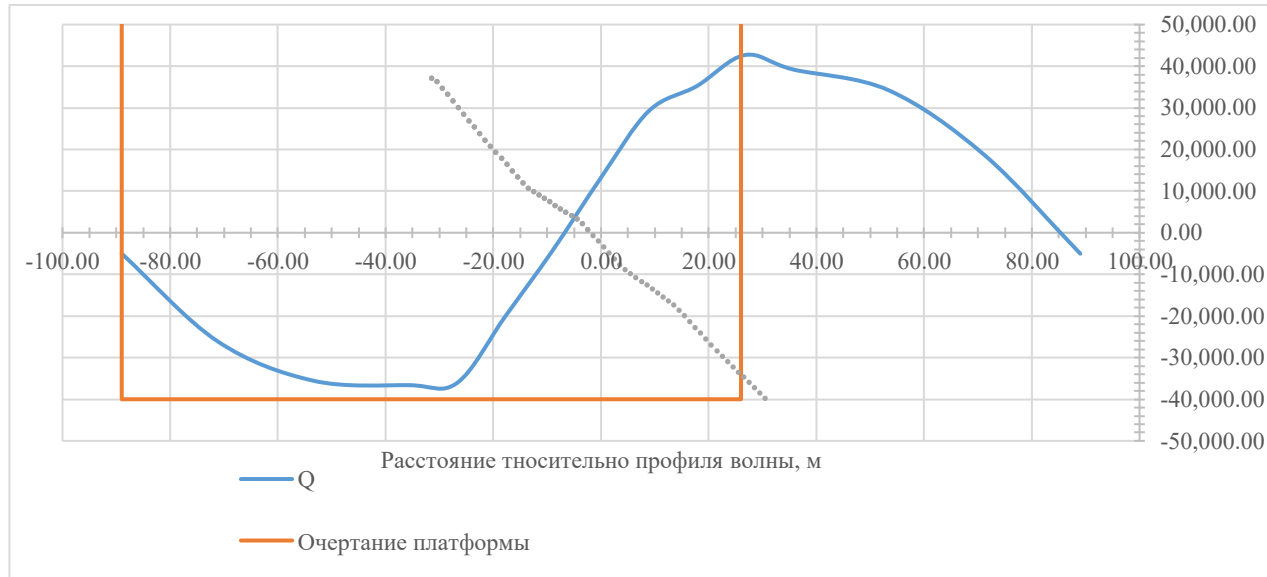


Рисунок 9. График изменения волновой нагрузки $Q = f(\varepsilon)$ на отдельную колонну.

6.2 Определение ледовой нагрузки.

Расчет ледовой нагрузки от полей ровного однолетнего льда на колонну выполнен согласно разделу 8 СП 38.13330.2018. Исходные данные: толщина льда $h_d = 2,0$ м, предел прочности льда на сжатие $R_c = 2,4$ МПа, прочность на изгиб $R_f = 0,7$ МПа, плотность воды $\rho = 1027$ кг/м³.

Результаты расчета ледовой нагрузки в зависимости от скорости дрейфа льда представлены на Рис. 10. Максимальная нагрузка на колонну составляет 88,8 МН при скорости дрейфа 0,3 м/с. При скорости дрейфа свыше 0,4 м/с нагрузка стабилизируется и достигает значения $F_{bp} = 120,8$ МН — предельной нагрузки, определяемой прочностью льда на смятие.

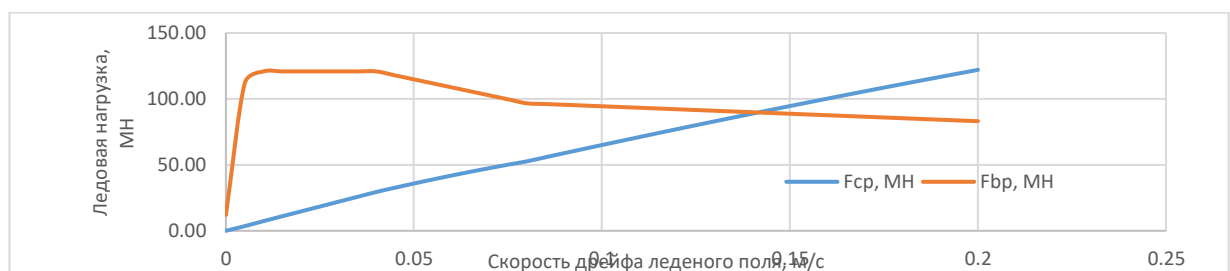
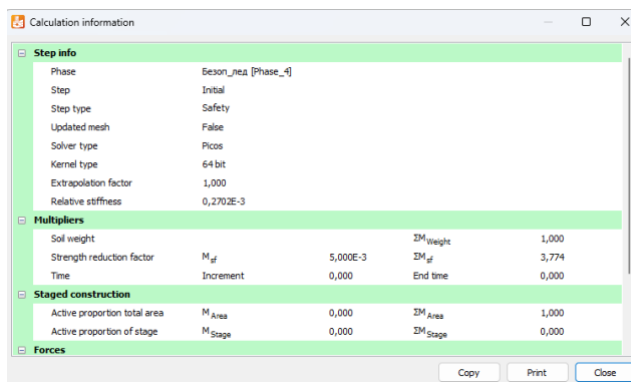


Рисунок 10. График зависимости ледовой нагрузки от скорости дрейфа ледяного поля: 1 — нагрузка от движущегося поля $F_{cp}(V)$; 2 — предельная нагрузка по прочности льда $F_{бр}$.

7 Оценка напряженно-деформированного состояния

Численное моделирование в программных комплексах Plaxis 3D и SCAD Office подтвердило надежность конструктивных решений [20, 21].

По первой группе предельных состояний: Коэффициент безопасности для наиболее напряженных элементов фундамента (по результатам геотехнических расчетов) составил 3,22 (Рис. 11), что значительно превышает требуемые значения [22].



Calculation information			
Step info			
Phase	Безоп_лед [Phase_4]		
Step	Initial		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	1,000		
Relative stiffness	0,2702E-3		
Multipliers			
Soil weight			IM weight 1,000
Strength reduction factor	M_{st}	5,000E-3	IM _{st} 3,774
Time	Increment	0,000	End time 0,000
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0,000	IM Area 1,000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	IM Stage 0,000
Forces			

Рисунок 11. Результаты расчета коэффициента безопасности основания в ПК Plaxis 3D.

По второй группе предельных состояний: Максимальная осадка основания, определенная в Plaxis 3D, составила 0,66 м (Рис. 12), а горизонтальные перемещения — 0,16 м (Рис. 13). Данные значения признаны допустимыми для данного типа сооружений и не приводят к нарушению условий эксплуатации бурового райзера. Конструкция верхнего строения имеет запас по высоте для обеспечения незатопляемости при максимальных перемещениях [7, 23].

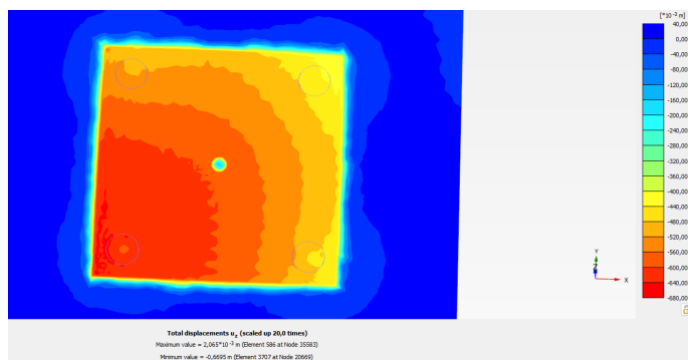


Рисунок 12. Карта вертикальных перемещений (осадок) основания в ПК Plaxis 3D.

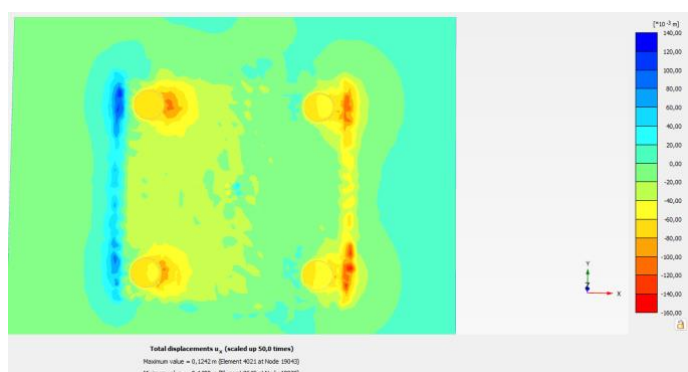


Рисунок 13. Карта горизонтальных перемещений основания в ПК Plaxis 3D.

8 Многофункциональность ГКФ и перспективы развития

Разработанный гравитационно-кессонный фундамент спроектирован как универсальная морская платформа, обладающая рядом принципиальных преимуществ, выходящих за рамки его прямого назначения в системе «Тюлень».

Использование в качестве кондуктора. ГКФ, оснащенный вакуумными кессонами, может служить надежным кондуктором для якорения других плавучих объектов. Например, на оголовках колонн фундамента могут быть размещены швартовные и якорные устройства, обеспечивающие фиксацию плавучих буровых установок, судов снабжения, плавучих энергоблоков или исследовательских судов в ледовых условиях. Высокая удерживающая способность ГКФ позволяет использовать его в качестве центрального элемента системы многоточечного якорного крепления, способного удерживать суда водоизмещением до 100 000 тонн при ледовых

нагрузках до 88 МН. Это особенно актуально для организации круглогодичного логистического обеспечения в районах с отсутствием портовой инфраструктуры.

Основание для добычной платформы. Поскольку проектируемая платформа относится к сооружениям I (повышенного) класса ответственности, расчетный срок её эксплуатации составляет 3–5 лет, а конструкция рассчитана на восприятие нагрузок с максимальной обеспеченностью (шторм 1 раз в 100 лет, ледовое воздействие 1 раз в 100 лет). Это делает ГКФ пригодным для длительного использования в качестве основания для стационарной добычной платформы [7]. Для этого достаточно демонтировать мобильную СПБУ и установить на ГКФ специализированное верхнее строение, оснащенное оборудованием для добычи, подготовки и транспортировки углеводородов. Такая трансформация не требует усиления фундамента или замены кессонов, так как изначальные проектные нагрузки уже учитывают условия эксплуатации стационарной добычной платформы. Это позволяет существенно сократить капитальные затраты на обустройство месторождения, поскольку не требуется строительство нового гравитационного основания, а сроки ввода в эксплуатацию сокращаются на 12–18 месяцев (время, необходимое для строительства и установки нового фундамента).

9 Безопасность и экологичность

Применение разделяемой концепции позволяет кардинально изменить логистику разведочного бурения. Массивный фундамент может быть доставлен и установлен заранее, независимо от сезонных окон. Легкая и маневренная СПБУ способна быстро покинуть точку бурения при угрозе тяжелых ледовых условий и возвращаться обратно (под сопровождением ледокольных судов), что недостижимо для традиционных стационарных решений [3, 8]. Система обеспечивает полный цикл «нулевого сброса»: все отходы бурения (выбуренный шлам, отработанный буровой раствор) и хозяйственно-бытовые стоки собираются в герметичные емкости и

транспортируются на берег для утилизации. Это гарантирует сохранность хрупкой арктической экосистемы и исключает загрязнение морской среды [24, 25].

Заключение

Представленная бионическая концепция разделяемой буровой системы «Тюлень» предлагает эффективный путь для освоения трудноизвлекаемых запасов Арктики, вдохновленный совершенными механизмами выживания арктической фауны. Выбор наиболее неблагоприятной расчетной точки по глубине, грунтовым условиям и ледово-волновому режиму гарантирует применимость разработанных конструктивных решений для всего района возможной эксплуатации в акватории Карского моря (см. Рис. 1). Результаты расчетов подтверждают, что предложенная конструкция удовлетворяет требованиям прочности, устойчивости и долговечности. Высокая мобильность и возможность круглогодичной эксплуатации (за счет модульности и обратимости фиксации) делают эту концепцию перспективной для масштабного внедрения в практике геологоразведочных работ на континентальном шельфе России. Многофункциональность ГКФ, позволяющая использовать его в качестве кондуктора или основания для добычной платформы, обеспечивает долгосрочную экономическую эффективность и снижает капитальные затраты на обустройство арктических месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Фаткулин А.А. Разработка ледостойкой мобильной буровой платформы для мелководного шельфа Арктики. Дис. ... канд. техн. наук. — М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2016. — 119 с.
2. Савинов Ю.А., Ганжинова С.А. Перспективы российских шельфовых проектов в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 4(28). — С. 108–117.

3. Амосова Н.В., Благовидова И.Л., Иванова Н.С. [и др.]. Концептуальные проектные решения для погружной комбинированной буровой установки для круглогодичного бурения в арктических условиях // Научные проблемы водного транспорта. — 2021. — № 68. — С. 37–53.

4. Миронов М.Е. Буровая платформа «Беркут». Проектирование, изготовление и установка основания. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2015. — 412 с.

5. ГОСТ Р 58772-2019. Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Морские операции. — М.: Стандартинформ, 2019. — 46 с.

6. IADC Guidelines for the Selection and Operations of Jack-ups in the Marine Renewable Energy Industry. — International Association of Drilling Contractors, 2015. — 68 p.

7. СП 58.13330.2019. Гидротехнические сооружения. Основные положения. — М.: Минстрой России, 2019. — 39 с.

8. Хвалимова А.А., Благовидова И.Л., Иванова Н.С. Анализ применимости различных типов буровых установок для разведочного бурения в арктических условиях // Russian Journal of Water Transport. — 2022. — № 74. — С. 15–26.

9. Wen F., Han F. Review and Cost Analysis of Anchored Foundation for Floating Offshore Wind Turbine // Southern Energy Construction. — 2025. — DOI: 10.16516/j.ceec.2024-435.

10. СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. — М.: Минстрой России, 2021. — 92 с.

11. Rehtin E.C. Jacking apparatus for tubular piles and caissons. — Patent US3058189 USA, 1962.

12. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. — М.: Стандартинформ, 2014. — 18 с.

13. Несамостоятельная СПБУ «Арктическая» // Энциклопедия нефтяного машиностроения. — 2010. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа:

<https://xn--80adi3aw0c.xn--p1ai/rus/production/sea-tech/arctic.html> (дата обращения: 04.2026).

14. Suderow C.H. Internal and external jack assembly for telescopic caissons. — Patent US2984075 USA, 1961.

15. СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). — М.: Минстрой России, 2018. — 56 с.

16. Барышев В.Н., Сабодаш О.А. Проектирование ледостойкой платформы для разведочного бурения в мелководной зоне арктических морей на слабых грунтах // Вестник Инженерной школы ДВФУ. — 2016. — № 3(28). — С. 7–12.

17. Беккер А.Т. Вероятностные характеристики ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа. — Владивосток: Дальнаука, 2004. — 401 с.

18. Анализ волнового климата Карского моря по данным ERA-Interim за период 2005–2018 гг. // Океанология. — 2019. — Т. 59, № 3. — С. 361–375.

19. Suderow C.H. Internal and external jack assembly for telescopic caissons. — Patent US2984075 USA, 1961.

20. Plaxis 3D. Reference Manual. — Bentley Systems, 2023. — 528 p.

21. SCAD Office. Руководство пользователя. — Киев: SCAD Group, 2021. — 480 с.

22. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. — М.: Стандартинформ, 2014. — 18 с.

23. СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. — М.: Минстрой России, 2021. — 92 с.

24. Neff J.M. Composition, Environmental Fates, and Biological Effects of Water Based Drilling Muds and Cuttings Discharged to the Marine Environment. — Duxbury: Battelle Memorial Institute, 2005. — 150 p.

25. Дмитриев К.Л., Абрамов С.А., Иванов И.Д. Биотехнология очистки хозяйственно-бытовых сточных вод в арктических условиях с применением

мембранных биореакторов // Водоснабжение и санитарная техника. — 2021.
— № 5. — С. 22–29.