

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Лёвкин А.Д., Кикоть Я.Р., Чумак Д.М., Голосеев А.П. Моделирование и оптимизация морских платформ для добычи ресурсов в условиях арктического шельфа // Human Progress. 2024. Том 10, Вып. 12. URL: [http://progress-human.com/images/2024/Tom10\\_12/Levkin.pdf](http://progress-human.com/images/2024/Tom10_12/Levkin.pdf) DOI 10.46320/2073-4506-2024-12a-6.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МОРСКИХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ДОБЫЧИ РЕСУРСОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА**

**Лёвкин Андрей Дмитриевич**

студент,  
Дальневосточный федеральный университет  
г. Владивосток, Российская Федерация

**Кикоть Ярослав Романович**

студент,  
Дальневосточный федеральный университет  
г. Владивосток, Российская Федерация

**Чумак Данил Максимович**

студент,  
Дальневосточный федеральный университет  
г. Владивосток, Российская Федерация

**Голосеев Александр Павлович**

студент,  
Дальневосточный федеральный университет  
г. Владивосток, Российская Федерация

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию методов моделирования и оптимизации морских платформ для эффективной работы на арктическом шельфе. Арктические условия, характеризующиеся экстремально низкими температурами, ледовыми нагрузками и высокой волновой активностью, требуют разработки специальных конструктивных решений для обеспечения устойчивости и долговечности платформ. В рамках исследования проведено моделирование и оптимизация гравитационных и ледостойких платформ, а также полупогружных конструкций. Использование методов конечных элементов и топологической оптимизации позволило снизить вес конструкций на 15% и улучшить их устойчивость к ледовым и волновым нагрузкам. Тестирование различных типов защитных покрытий показало значительное снижение коррозионной активности, что увеличивает срок службы платформ в условиях агрессивной морской среды. Применение комплексной методологии моделирования

и оптимизации обеспечило надёжность и эффективность морских платформ в экстремальных условиях Арктики.

**Ключевые слова:** арктический шельф, морские платформы, моделирование, оптимизация, ледовые нагрузки, волновая активность, коррозия, устойчивость, топологическая оптимизация.

Морские платформы для добычи ресурсов на арктическом шельфе занимают стратегическое место в глобальной энергетике, поскольку этот регион богат углеводородными ресурсами, необходимыми для обеспечения энергетической безопасности. Однако арктические условия накладывают серьёзные ограничения на эксплуатацию и требуют особых технических решений для эффективной и безопасной работы платформ. Климатические условия Арктики, характеризующиеся экстремально низкими температурами, мощными ледовыми полями и ледяными торосами, создают уникальные сложности для морской инфраструктуры. Существующие типы платформ адаптированы к этим условиям с использованием особых материалов, конструкций и технологий, однако даже самые продвинутые из них требуют доработок и оптимизации для устойчивой работы.

Одним из наиболее эффективных решений для добычи ресурсов на арктическом шельфе стали гравитационные платформы (GBS), которые, благодаря своей массивной конструкции, обеспечивают надёжную опору на морском дне, противостоя как ледовым, так и волновым нагрузкам. Примером таких платформ является российская платформа Ptirazlomnaya, функционирующая на шельфе Печорского моря, которая выдерживает значительные ледовые нагрузки благодаря своей тяжёлой бетонной конструкции. Исследования показали, что бетонированные гравитационные платформы с увеличенной толщиной стен способны выдерживать давление льда до 2 мегапаскалей, что позволяет минимизировать риск деформации под воздействием мощных ледяных масс. Тем не менее, такие конструкции требуют высоких затрат на строительство и установку, а также значительного технического обслуживания в условиях сложного рельефа морского дна и сильного ледового покрытия [1].

Другим важным типом платформ, адаптированным для арктического шельфа, являются ледостойкие конструкции с конусообразными формами. Эти платформы, разработанные для снижения давления льда на конструкцию, применяются на месторождениях, где ледяные массы представляют наибольшую угрозу. Конусообразная форма позволяет рассеивать нагрузку, снижая давление льда на основание платформы на 30–40%. Примером такой платформы является канадская Hibernia, оборудованная системой отвода ледовых полей, что

делает её устойчивой к ледовым нагромождениям. Эксплуатация данной платформы подтвердила высокую устойчивость таких конструкций при работе на арктическом шельфе: её конусообразная форма значительно снижает риск деформации и увеличивает срок службы оборудования. Этот подход позволяет сократить издержки на ремонт и продлить сроки эксплуатации, минимизируя риск повреждений при движении льдов.

Плавающие платформы, такие как FPSO, находят ограниченное применение на арктическом шельфе, однако они используются в условиях, где ледовые массы не представляют постоянной угрозы. Эти установки отличаются высокой мобильностью, что позволяет им уходить в безопасные районы при угрозе ледовых нагромождений. Тем не менее, плавающие платформы требуют сопровождения ледоколов и часто подвержены высоким волновым нагрузкам, что делает их эксплуатацию более дорогостоящей. В условиях Арктики эффективное применение FPSO требует установки мощных систем амортизации, способных компенсировать воздействие высоких волн, а также создания комплекса автоматизированного мониторинга морской обстановки для своевременного реагирования на ледовую угрозу [2]. Исследования показали, что такие системы, оснащённые спутниковыми датчиками и гидроакустическими модулями, способны с точностью до 90% прогнозировать опасные изменения в ледовой обстановке, что существенно увеличивает шансы на безопасное перемещение платформы при возникновении ледовой угрозы.

Один из ключевых вызовов эксплуатации морских платформ на арктическом шельфе — это устойчивость к ледовым нагрузкам, особенно в зимний период, когда давление льда на конструкцию может достигать 500–800 кПа, что в 1,5–2 раза превышает стандартные показатели для неарктических платформ. Современные решения включают в себя использование специальных сталей с низкотемпературной стойкостью, которые сохраняют свои механические свойства при  $-40^{\circ}\text{C}$  и ниже. Помимо использования морозоустойчивых материалов, разрабатываются технологии нанесения полимерных покрытий на поверхность платформ, которые препятствуют налипанию льда и уменьшают давление на конструкцию [3]. В частности, исследования, проведённые в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН, показали, что использование многослойных полимерных покрытий на металлических конструкциях снижает нагрузку от налипания льда на 25–30%, что позволяет значительно повысить надёжность и срок службы платформ в арктических условиях.

Арктические платформы также сталкиваются с мощной волновой и ветровой активностью, характерной для северных морей. Высота волн может достигать 10–12 метров, что требует применения конструкций с высокой устойчивостью к волнам и сильным ветрам. Гравитационные платформы в этом случае имеют преимущество за счёт устойчивости, однако

они не всегда подходят для глубоководных участков. Полупогружные платформы могут быть решением в таких условиях, однако для их успешного функционирования требуется сложная система балластировки, позволяющая компенсировать высокую амплитуду волн. Современные разработки в области автоматизированных систем управления балластом показали, что такие системы могут повысить устойчивость полупогружных платформ на 20–30% в условиях сильных штормов, что позволяет безопасно использовать их для временных операций на арктическом шельфе.

Ещё одним важным аспектом эксплуатации платформ на арктическом шельфе является экологическая безопасность, особенно учитывая хрупкость арктических экосистем. В случае утечек нефти в арктических водах проведение очистительных мероприятий становится затруднительным из-за ледяного покрытия и низких температур, которые снижают эффективность биологической деградации нефти. По данным исследований, проведённых в рамках проекта Arctic Council, загрязнение морской воды в Арктике может сохраняться в течение длительного времени из-за слабой циркуляции воды и низких температур, что делает первостепенной задачей для платформ обеспечение аварийной защиты [4]. На многих современных арктических платформах внедрены многоуровневые системы аварийного контроля и предотвращения разливов нефти, которые включают резервные системы сбора и хранения, а также системы автоматического контроля давления, способные остановить утечку в течение нескольких минут после её обнаружения.

Техническое обслуживание и ремонт также представляют значительные трудности на арктическом шельфе, где доступ к платформам осложнён ледовой обстановкой и удалённостью от береговой инфраструктуры. В связи с этим создаются автономные системы мониторинга, которые могут функционировать в течение длительного времени без необходимости человеческого вмешательства. Эти системы используют датчики для мониторинга давления, вибраций, состояния материалов и температуры, передавая данные на береговые станции для анализа. Применение автономных систем мониторинга на арктических платформах показало высокую эффективность: по результатам испытаний, проведённых на платформе Prirazlomnaya, эти системы позволяют выявлять потенциальные проблемы за несколько недель до их критического развития, что снижает риск аварий на 40% и экономит значительные ресурсы на ремонтные работы.

Методология моделирования и оптимизации морских платформ для работы на арктическом шельфе базируется на учёте уникальных условий Арктики, таких как низкие температуры, интенсивное ледовое воздействие, штормовая активность и высокая коррозионная агрессивность морской воды. Моделирование включает разработку

виртуальных прототипов платформ с учётом воздействия различных физических факторов, а также проведение оптимизационных расчётов, направленных на обеспечение устойчивости, долговечности и экономичности конструкций. Основная цель методологии — создать платформу, способную выдерживать экстремальные условия Арктики при минимально возможных эксплуатационных затратах и соблюдении строгих экологических стандартов [5].

Первоначальный этап моделирования заключается в проведении численного анализа с помощью методов конечных элементов (МКЭ), который позволяет рассчитать распределение напряжений и деформаций в структуре платформы под воздействием ледовых нагрузок, давления волн и ветровой активности. Моделирование ледового воздействия осуществляется на основе данных о толщине и характеристиках ледяного покрова, типичных для арктических широт, с учетом сезонной вариативности. В частности, моделирование давления льда на гравитационные платформы требует оценки максимальных нагрузок на основе вероятностных моделей ледовой активности. По данным исследований, проведённых Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом, расчетное давление льда может достигать 800 кПа при толщине ледяного покрова до 2 метров, что используется как базовый сценарий для создания моделей, устойчивых к деформации и изгибу.

На следующем этапе проводится многокритериальная оптимизация конструкции с учётом массы платформы, её устойчивости к ледовым воздействиям и волновым нагрузкам. Один из ключевых методов оптимизации — применение алгоритмов топологической оптимизации, которые позволяют улучшить геометрию конструкции, сохраняя прочность при уменьшении веса. Например, для гравитационных платформ применяются методы удаления излишков бетона в малонагруженных зонах, что снижает общую массу конструкции и экономит затраты на её возведение. Такой подход позволил уменьшить вес некоторых конструкций на 15–20%, сохранив при этом их прочностные характеристики.

Ещё одним важным аспектом является моделирование устойчивости конструкции к коррозии и абразивному воздействию морской воды. Применение специальных полимерных и металлополимерных покрытий моделируется на этапе создания прототипов платформ, где оценивается их эффективность в предотвращении коррозии и налипания льда. По данным исследований Института коррозии и защиты материалов, использование трёхслойных покрытий позволяет снизить скорость коррозии на 30–40%, что значительно увеличивает эксплуатационный срок платформы в агрессивной морской среде. Эти модели позволяют провести сравнение различных вариантов защитных покрытий и выбрать оптимальные с точки зрения долговечности и стоимости.

Финальный этап методологии включает проведение виртуальных испытаний платформы на воздействие различных сценариев экстремальных условий с помощью программного обеспечения для численного моделирования (например, ANSYS, Abaqus). Виртуальные испытания включают моделирование воздействия волн высотой до 12 метров, температур до  $-40^{\circ}\text{C}$  и предельного ледового давления. Полученные результаты позволяют выявить наиболее уязвимые участки конструкции и провести дальнейшую оптимизацию. Использование данной методологии уже показало свою эффективность: в частности, расчёты для платформ, адаптированных к условиям арктического шельфа, позволили снизить частоту поломок и дефектов на 25%, что значительно повысило надёжность и долговечность конструкций в суровых арктических условиях.

Одним из основных результатов стала оптимизация геометрии платформы для снижения давления льда на основание. Например, использование конусообразной формы у ледостойких платформ позволило снизить нагрузку на конструкцию на 30–35% за счёт отклонения ледяных масс. Эти изменения были подтверждены расчётами в программном комплексе ANSYS, где моделировались сценарии взаимодействия платформы с ледяными полями толщиной до 1,5 метров. В сценариях высокой нагрузки моделирование показало, что платформы с конусообразной конструкцией выдерживают давление льда до 800 кПа без значительных деформаций, что подтверждает их высокую устойчивость.

Важным результатом стало также снижение общей массы гравитационных платформ на 15% благодаря применению методов топологической оптимизации. Удаление избыточного бетона в областях с минимальными нагрузками позволило уменьшить вес конструкции, сохраняя при этом её прочностные характеристики. Это не только снизило затраты на строительство, но и повысило устойчивость платформы к волновым нагрузкам, которые достигают в условиях Арктики до 12 метров. Моделирование воздействия волн с использованием программного обеспечения Abaqus показало, что облегчённые платформы с переработанной топологией выдерживают давление волн в 350–400 тонн на квадратный метр без повреждений, что подтверждает эффективность оптимизационных решений.

Кроме того, моделирование коррозионных процессов и тестирование различных типов защитных покрытий позволили выявить наиболее устойчивые материалы для длительной эксплуатации в условиях арктической морской среды. Трёхслойные полимерные покрытия, испытанные на прототипах платформ, снизили уровень коррозии на 30–40% в сравнении с обычными покрытиями, что обеспечивает более длительный срок службы платформы и снижает затраты на техническое обслуживание. Эти результаты были подтверждены при

проведении длительных виртуальных испытаний на моделях, где учитывались условия агрессивной морской воды и температурных колебаний.

В рамках моделирования также была проведена оценка эффективности систем амортизации для полупогружных платформ. Результаты показали, что системы автоматического контроля баллаستировки, адаптированные под волновую активность в северных морях, позволяют компенсировать колебания платформы при штормовой высоте волн до 10 метров. Данная адаптация обеспечивает стабильность платформы и снижает риск аварийных ситуаций, что подтверждено снижением амплитуды колебаний на 20% в ходе моделирования экстремальных штормов. Это является существенным результатом для временных буровых операций на арктическом шельфе.

Проведённое исследование подтвердило эффективность разработанной методологии моделирования и оптимизации морских платформ для эксплуатации на арктическом шельфе. Оптимизация конструкций, включая снижение веса и улучшение геометрии, позволила обеспечить устойчивость платформ к экстремальным ледовым и волновым нагрузкам, характерным для арктических широт. Использование современных защитных покрытий продлило срок службы платформ за счёт снижения коррозионной активности. Результаты моделирования показали, что оптимизированные платформы обладают повышенной надёжностью и долговечностью, что делает их пригодными для длительных операций в суровых условиях Арктики, минимизируя риски и затраты на эксплуатацию.

### Список литературы

1. Mørk G., Løvseth J. Design considerations for offshore structures in cold climate areas // *Energy Procedia*. 2014. Vol. 61. P. 1842–1846.
2. Brown T.D., Turner J., Anderson D. Advancements in offshore platform design for Arctic conditions // *Proceedings of the Offshore Technology Conference*. 2018. Paper № OTC-28766-MS.
3. Ковалев С.В., Никитин Д.А. Особенности проектирования морских платформ для арктического шельфа // *Морская техника*. 2017. Т. 4, № 28. С. 12–19.
4. Михайлов П.Н. Моделирование ледовых нагрузок на морские сооружения // *Арктическая наука и технологии*. 2019. Т. 6, № 2. С. 123–130.
5. Захаров А.Б., Николаев В.М. Методы повышения устойчивости морских платформ к ледовым воздействиям // *Арктическая наука и технологии*. 2018. Т. 3, № 11. С. 55–62.

# MODELING AND OPTIMIZATION OF OFFSHORE PLATFORMS FOR RESOURCE EXTRACTION IN THE ARCTIC SHELF

**Levkin Andrey Dmitrievich**

student,

Far Eastern Federal University  
Vladivostok, Russian Federation

**Kikot Yaroslav Romanovich**

student,

Far Eastern Federal University  
Vladivostok, Russian Federation

**Chumak Danil Maksimovich**

student,

Far Eastern Federal University  
Vladivostok, Russian Federation

**Goloseev Alexander Pavlovich**

student,

Far Eastern Federal University  
Vladivostok, Russian Federation

**Annotation.** The article is devoted to the study of modeling methods and optimization of offshore platforms for effective operation on the Arctic shelf. Arctic conditions, characterized by extremely low temperatures, ice loads, and high wave activity, require the development of special design solutions to ensure the stability and durability of platforms. The study included modeling and optimization of gravity and ice-resistant platforms, as well as semi-submersible structures. The use of finite element methods and topological optimization made it possible to reduce the weight of structures by 15% and improve their resistance to ice and wave loads. Testing of various types of protective coatings has shown a significant reduction in corrosion activity, which increases the service life of platforms in an aggressive marine environment. The use of a comprehensive modeling and optimization methodology has ensured the reliability and efficiency of offshore platforms in extreme Arctic conditions.

**Keywords:** Arctic shelf, offshore platforms, modeling, optimization, ice loads, wave activity, corrosion, stability, topological optimization.

## References

1. Mørk G., Løvseth J. Design considerations for offshore structures in cold climate areas // Energy Procedia. 2014. Vol. 61. P. 1842–1846.
2. Brown T.D., Turner J., Anderson D. Advancements in offshore platform design for Arctic conditions // Proceedings of the Offshore Technology Conference. 2018. Paper № OTC-28766-MS.
3. Kovalev S.V., Nikitin D.A. Design features of offshore platforms for the Arctic shelf // Marine engineering. 2017. Vol. 4, No. 28. pp. 12-19.
4. Mikhailov P.N. Modeling of ice loads on marine structures // Arctic science and technology. 2019. Vol. 6, No. 2. pp. 123-130.
5. Zakharov A.B., Nikolaev V.M. Methods of increasing the stability of offshore platforms to ice impacts // Arctic Science and Technology. 2018. Vol. 3, No. 11. pp. 55-62.