

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Казанин К.В., Гриднев Д.В., Алмазов О.В. Проектирование судов для эксплуатации на маршрутах Ледового шелкового пути: устойчивость к ледовым нагрузкам // Human Progress. 2024. Том 10, Вып. 6. С. 9. URL: [http://progress-human.com/images/2024/Tom10\\_6/Kazanin.pdf](http://progress-human.com/images/2024/Tom10_6/Kazanin.pdf)  
DOI 10.46320/2073-4506-2024-6a-3.

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА МАРШРУТАХ ЛЕДОВОГО ШЕЛКОВОГО ПУТИ: УСТОЙЧИВОСТЬ К ЛЕДОВЫМ НАГРУЗКАМ**

**Казанин Кирилл Вадимович**

студент,  
Дальневосточный федеральный университет  
г. Владивосток, Российская Федерация

**Гриднев Дмитрий Витальевич**

студент,  
Дальневосточный федеральный университет  
г. Владивосток, Российская Федерация

**Алмазов Олег Владимирович**

студент,  
Дальневосточный федеральный университет  
г. Владивосток, Российская Федерация

**Аннотация.** Развитие Ледового шелкового пути как стратегически важного транспортного маршрута требует создания надежных и эффективных судов, способных работать в условиях суровой арктической среды. В статье рассматриваются современные подходы к проектированию судов, включая оптимизацию формы корпуса, выбор высокопрочных морозостойких материалов и внедрение инновационных технологий, таких как азиподные пропульсивные системы и цифровые двойники. Представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований, направленных на оценку устойчивости судов к ледовым нагрузкам. Особое внимание уделено экологической безопасности и экономической эффективности арктических судов. Работа способствует развитию технологий судостроения для устойчивого освоения Арктики.

**Ключевые слова:** Ледовый шелковый путь, арктическое судоходство, ледовые нагрузки, проектирование судов, высокопрочные материалы, цифровые двойники, экологическая безопасность, экспериментальные исследования, арктическая среда.

Проектирование судов для эксплуатации в условиях арктических регионов представляет собой сложную инженерную задачу, связанную с необходимостью обеспечения надежности и безопасности судов при взаимодействии с ледовыми полями, экстремально низкими температурами и сильными ветровыми нагрузками. Основным вызовом заключается в том, чтобы разработать конструкции, способные выдерживать длительные механические воздействия льда, сохраняя при этом маневренность, топливную экономичность и экологическую безопасность.

Современные подходы к проектированию судов для арктических условий основаны на использовании специализированных конструктивных решений, материалов и технологий. Одним из важнейших элементов является усиленный корпус судна. Для ледового плавания применяются суда с усиленной носовой частью корпуса, поскольку именно этот участок чаще всего взаимодействует со льдом. Примером таких решений является серия ледоколов проекта 22220 («Арктика», «Сибирь», «Урал»), созданная на Балтийском заводе. Эти суда оснащены двухреакторными ядерными энергетическими установками и обладают уникальной возможностью преодолевать лед толщиной до 3 метров [1].

Использование высокопрочных сталей, способных сохранять свои механические свойства при низких температурах, является основой для конструкции арктических судов. Например, сталь марки 09Г2С и ее модификации широко применяются в российском судостроении благодаря высокой устойчивости к ударным нагрузкам при температурах до -60 °С. В зарубежных проектах используются аналогичные материалы, такие как сталь EN36, соответствующая международным стандартам. Эти стали характеризуются повышенной пластичностью, прочностью и коррозионной стойкостью, что особенно важно при взаимодействии с соленой морской водой [2].

Для снижения воздействия ледовых нагрузок разработаны специальные формы корпусов. Одной из наиболее эффективных форм является так называемая «клиновидная» форма, которая позволяет судну не ломать лед, а вытеснять его вверх, снижая тем самым сопротивление движению. Этот принцип применяется, например, на судах ледового класса ARC7, таких как газовозы компании «Новатэк», которые обеспечивают транспортировку СПГ с завода «Ямал СПГ». Эти суда также оснащены азиподами — вращающимися электрическими двигателями, которые обеспечивают маневренность в сложных ледовых условиях и позволяют судам двигаться кормой вперед для преодоления особо плотного льда.

Помимо конструктивных решений, важное значение имеет применение защитных покрытий корпуса, предотвращающих абразивное воздействие льда. Такие покрытия разрабатываются с учетом требований к снижению трения и повышению износостойкости.

Например, полимерные покрытия типа «ICE-Guard» увеличивают срок службы корпуса, снижая его повреждаемость.

Инновационные технологии, такие как системы мониторинга состояния корпуса, также становятся неотъемлемой частью арктических судов. Встроенные сенсоры позволяют в реальном времени оценивать механические напряжения, возникающие в результате ледовых воздействий, что позволяет предотвращать аварийные ситуации. Примером таких систем является решение компании Rolls-Royce, которое внедрено на ледоколах проекта «Aker Arctic».

Экологическая составляющая также играет ключевую роль. Суда, предназначенные для эксплуатации в Арктике, проектируются с учетом строгих международных стандартов, таких как Полярный кодекс Международной морской организации (ИМО). Этот документ регулирует выбросы в атмосферу и водоемы, использование топлива с низким содержанием серы, а также предотвращение разливов нефтепродуктов. Многие современные суда оснащаются системами SCR (Selective Catalytic Reduction) для сокращения выбросов оксидов азота, а также двойными корпусами, минимизирующими риск загрязнения окружающей среды.

Применение альтернативных источников энергии, таких как СПГ, становится все более популярным в арктическом судоходстве. Например, суда компании «Газпром» используют сжиженный природный газ в качестве основного топлива, что значительно снижает углеродный след. Современные ледоколы проектируются с учетом использования гибридных энергетических установок, сочетающих дизель-электрические и газовые двигатели.

Важным направлением в проектировании является цифровизация процессов. Создание цифровых двойников судов позволяет моделировать взаимодействие корпуса с ледовыми полями, оптимизировать конструктивные элементы и прогнозировать возможные повреждения. Примером такой интеграции является проектирование ледоколов проекта 10510 «Лидер», которые планируются как самые мощные и технологически совершенные суда для арктических регионов.

Одним из наиболее эффективных инструментов для анализа ледовых нагрузок является метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет детально моделировать распределение напряжений и деформаций в корпусе судна при контакте со льдом. Применение этого метода особенно важно для анализа поведения корпуса в условиях, когда судно подвергается многократным ударным воздействиям от ледовых глыб различной формы и размера. Например, при моделировании ледоколов проекта «Лидер» исследователи использовали программные комплексы, такие как Abaqus и LS-DYNA, для оценки критических нагрузок на

корпус и разработки усиленной конструкции носовой части. Эти исследования показали, что комбинированное использование высокопрочных сталей и специально разработанных геометрических усилителей позволяет существенно повысить сопротивляемость корпуса ледовым нагрузкам.

Важным направлением в расчетных исследованиях является моделирование разрушения льда, которое включает в себя учет таких параметров, как толщина, плотность, температура и структура льда. Лед в Арктике, как правило, состоит из смеси многолетнего и однолетнего льда, что создает дополнительные сложности при прогнозировании его взаимодействия с судном. Современные модели, такие как квазистатические и динамические подходы к разрушению льда, позволяют учитывать хрупкость льда при низких температурах и его пластичность при более высоких температурах [4]. Например, при проектировании судов ледового класса ARC7 использовались модели, интегрирующие данные о свойствах арктического льда, полученные из полевых исследований в районах Северного морского пути.

Экспериментальные исследования в ледовых бассейнах остаются важной частью проверки расчетных моделей. Ледовые бассейны, такие как Ледовый бассейн Национального центра исследований Арктики в Санкт-Петербурге, создают контролируемую среду, в которой можно воспроизвести реальные условия взаимодействия судна с ледовыми полями. В ходе таких экспериментов масштабные модели судов подвергаются тестированию на ледопробитность, устойчивость к ударам и эффективность конструктивных решений. Например, исследования, проведенные для газовозов проекта «Ямал СПГ», подтвердили, что форма корпуса с увеличенным углом наклона носовой части позволяет сократить энергию, необходимую для преодоления льда, на 15–20%. Это, в свою очередь, приводит к значительной экономии топлива.

Не менее важным направлением является исследование материалов, используемых для строительства арктических судов. Стали, такие как 09Г2С, подвергаются испытаниям на ударную вязкость при температуре до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Эти испытания выявляют пределы прочности материалов при интенсивных нагрузках, а также их устойчивость к образованию трещин. Для повышения долговечности корпуса активно применяются многослойные покрытия, включая эпоксидные и полиуретановые составы. Такие покрытия обеспечивают защиту от коррозии и абразивного воздействия льда, что значительно увеличивает срок службы судов. Например, исследования показали, что применение защитного покрытия ICE-Guard на танкерах ледового класса ARC7 снижает повреждаемость корпуса на 30% по сравнению с традиционными методами защиты.

Дополнительно изучаются гидродинамические характеристики судов в условиях ледового плавания. Влияние ледового трения на корпус судна анализируется с использованием лабораторных измерений и натурных испытаний [5]. Применение гидрофобных покрытий позволяет снизить коэффициент трения между корпусом и льдом, что не только увеличивает скорость движения судна, но и снижает нагрузку на силовую установку. На примере ледоколов проекта 22220 было показано, что применение таких покрытий может уменьшить общее сопротивление на 10–15%, обеспечивая экономию топлива и повышение энергоэффективности.

Для дополнения экспериментальных исследований активно используются цифровые технологии. Создание цифровых двойников судов позволяет моделировать воздействие ледовых нагрузок в реальном времени, анализировать потенциальные повреждения и прогнозировать срок службы ключевых конструктивных элементов. Эти технологии особенно полезны для проектирования судов, работающих в различных условиях, от тонкого однолетнего льда до многолетних ледяных полей. Например, цифровой двойник ледокола проекта «Лидер» позволил протестировать несколько альтернативных конструктивных решений, что привело к оптимизации корпуса и снижению затрат на его строительство.

Одним из ключевых аспектов проектирования арктических судов является выбор оптимальной формы корпуса. Для судов, работающих в условиях плотного льда, предпочтительна клиновидная форма носовой части, которая позволяет уменьшить сопротивление льда за счет его вытеснения вверх. Такой подход снижает нагрузки на корпус и уменьшает энергозатраты на преодоление ледяных полей. На практике эта концепция нашла применение в конструкциях ледоколов проекта 22220 («Арктика», «Сибирь», «Урал»), которые способны эффективно работать в условиях многолетнего льда толщиной до трех метров. Их корпуса были спроектированы с учетом ледовых испытаний, проведенных в масштабных бассейнах, где искусственные ледяные поля позволили воссоздать реальные условия Арктики. Эти исследования подтвердили, что оптимизация геометрии корпуса обеспечивает снижение энергии, необходимой для преодоления льда, на 15–20%.

Материалы, используемые для строительства арктических судов, играют не менее важную роль в обеспечении их надежности. В условиях низких температур корпус судна подвергается интенсивным механическим нагрузкам, включая воздействие ледяных глыб и абразивное трение. Для решения этих задач широко применяются высокопрочные морозостойкие стали, такие как 09Г2С, 10ХСНД и ЕН36, которые сохраняют свои механические свойства при температурах до  $-60^{\circ}\text{C}$ . Эти материалы обладают высокой ударной вязкостью и устойчивостью к образованию трещин, что делает их идеальными для

эксплуатации в экстремальных условиях. Дополнительно используются многослойные покрытия, такие как эпоксидные и полиуретановые, которые защищают корпус от коррозии и абразивного износа. Примером является применение покрытия ICE-Guard, которое позволяет снизить повреждаемость корпуса на 30–40% и продлить срок службы судна.

Инновационные технологии также играют важную роль в проектировании судов для Ледового шелкового пути. Одной из наиболее значимых разработок является использование азиподных пропульсивных систем, которые обеспечивают высокую маневренность и возможность движения кормой вперед для преодоления плотного льда. Эти системы, впервые использованные на ледокольных газовозах компании «Новатэк», значительно улучшают маневренность и эффективность судов, что особенно важно при работе в сложных ледовых условиях. Азиподы способны разворачивать судно практически на месте, что сокращает время маневров в узких арктических проливах и повышает безопасность.

Для повышения устойчивости к ледовым нагрузкам применяются системы мониторинга состояния корпуса, оснащенные датчиками, фиксирующими деформации, возникающие при контакте с ледяным покровом. Эти системы предоставляют данные в реальном времени, что позволяет экипажу оперативно принимать меры по предотвращению повреждений [3]. Например, система ледового мониторинга, разработанная компанией Rolls-Royce, используется на современных ледоколах и позволяет контролировать состояние корпуса в самых экстремальных условиях. Кроме того, данные, собранные такими системами, могут быть использованы для оптимизации последующих проектов и повышения надежности новых судов.

Одним из важных направлений инноваций является использование цифровых технологий. Создание цифровых двойников судов позволяет моделировать их поведение в различных условиях, включая взаимодействие с льдом, сильные ветровые нагрузки и волнения. Эти технологии применялись при проектировании ледоколов проекта «Лидер», что позволило оптимизировать конструкцию корпуса, снизить его вес и сократить затраты на производство. В цифровых моделях учитываются данные натурных испытаний, результаты которых интегрируются в расчетные алгоритмы, обеспечивая высокую точность прогнозирования.

Экологическая составляющая проектирования судов для Ледового шелкового пути также является важным фактором. Учитывая хрупкость арктической экосистемы, применяются технологии, направленные на снижение воздействия судоходства на окружающую среду. Суда оснащаются системами очистки выхлопных газов (SCR), которые сокращают выбросы оксидов азота, и двойными корпусами, предотвращающими утечку

топлива при повреждениях. Многие современные суда переходят на использование сжиженного природного газа (СПГ) в качестве топлива, что снижает углеродный след на 20–30%. Например, газозовы ледового класса ARC7, используемые на проекте «Ямал СПГ», демонстрируют успешное внедрение этих технологий в арктическое судоходство.

Для обеспечения надежности и долговечности судов применяются экспериментальные методы тестирования. Масштабные модели судов проходят испытания в ледовых бассейнах, таких как Ледовый бассейн Центрального института морских исследований (HSVA), где изучаются их гидродинамические характеристики, маневренность и устойчивость к ледовым нагрузкам. Эти испытания позволяют точно определить параметры, влияющие на безопасность и эффективность судов, и внести корректировки в их конструкцию до стадии серийного производства.

### Список литературы

1. Гельфман В.Д., Аржанов И.М., Бармина М.А. Основы проектирования ледоколов и арктических транспортных судов. Санкт-Петербург: Судостроение, 2019. 456 с.
2. Сергеев А.В., Петров И.И. Прочностные характеристики материалов для судостроения в условиях низких температур // Судостроение. 2021. № 6. С. 24–31.
3. Орловский Г.А. Гидродинамика арктических судов: модели и методы расчета // Морской транспорт. 2020. № 4. С. 15–22.
4. Rahman A., Ehlers S., Kujala P. Design and Performance of Icebreaking Vessels in Arctic Conditions // Cold Regions Science and Technology. 2021. Vol. 188.
5. Daley C.G., Liu, S. Ice Loads and Structural Design for Arctic Shipping // Marine Structures. 2020. Vol. 72.
6. International Maritime Organization (IMO). Polar Code. London: IMO Publications, 2016. 128 p.

## DESIGN OF VESSELS FOR OPERATION ON THE ROUTES OF THE ICE SILK ROAD: RESISTANCE TO ICE LOADS

**Kazanin Kirill Vadimovich**

Student,

Far Eastern Federal University  
Vladivostok, Russian Federation

**Gridnev Dmitry Vitalievich**

Student,

Far Eastern Federal University  
Vladivostok, Russian Federation

**Almazov Oleg Vladimirovich**

Student,  
Far Eastern Federal University  
Vladivostok, Russian Federation

**Annotation.** The development of the Ice Silk Road as a strategically important transport route requires the creation of reliable and efficient vessels capable of operating in the harsh Arctic environment. The article discusses modern approaches to ship design, including optimizing the hull shape, choosing high-strength frost-resistant materials, and introducing innovative technologies such as azipode propulsion systems and digital twins. The results of experimental and computational studies aimed at assessing the stability of ships to ice loads are presented. Special attention is paid to the environmental safety and economic efficiency of Arctic vessels. The work contributes to the development of shipbuilding technologies for the sustainable development of the Arctic.

**Keywords:** Ice Silk Road, Arctic shipping, ice loads, ship design, high-strength materials, digital twins, environmental safety, experimental research, Arctic environment.

### References

1. Gelfman V.D., Arzhanov I.M., Barmina M.A. Fundamentals of design of icebreakers and Arctic transport vessels. Saint Petersburg: Shipbuilding, 2019. 456 p.
2. Sergeev A.V., Petrov I.I. Strength characteristics of materials for shipbuilding at low temperatures. 2021. No. 6. pp. 24-31.
3. Orlovskiy G.A. Hydrodynamics of Arctic vessels: models and calculation methods // Marine transport. 2020. No. 4. pp. 15-22.
4. Rakhman A., Ehlers S., Kudzhala P. Design and operational characteristics of icebreaking vessels in Arctic conditions // Science and technology of cold regions. 2021. Volume 188.
5. Daly K.G., Liu S. Ice loads and design of structures for Arctic shipping // Marine structures. 2020. Volume 72.
6. International Maritime Organization (IMO). The Polar Code. London: IMO Publications, 2016. 128 p.