

УДК 627.24

Р. Ю. Горгуца, канд. техн. наук;
М. Е. Миронов, д-р техн. наук, проф.;
Я. А. Ситникова, инженер,
ООО «Морстройтехнология»,
г. Санкт-Петербург, Россия

**К ВОПРОСУ О ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДИК РАСЧЕТА
ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА ОБЪЕКТЫ ИНФРАСТРУКТУРЫ
ВОДНОГО ТРАНСПОРТА**

**ON APPLICABILITY OF METHODS FOR CALCULATING
ICE LOADS ON WATER TRANSPORT INFRASTRUCTURE
FACILITIES**

Аннотация. Опыт проектирования объектов инфраструктуры морских портов показал, что нормы по расчету ледовых нагрузок не во всех случаях дают

адекватные результаты. При рассмотрении нормативных методик целесообразно применение автоматизированного многофакторного анализа. К настоящему времени в ООО «Морстройтехнология» успешно реализованы и апробированы ряд программ для расчета ледовых нагрузок с учетом форм и размеров сооружений, толщины и прочности льда, размеров ледяных полей и пр. В статье приведены сведения о технологии и результатах математического моделирования ледового режима при проектировании гидротехнических сооружений в Лужской губе Финского залива, а также примеры сопоставления методик расчета ледовых нагрузок в отечественных и зарубежных нормах.

Abstract. Experience designing seaport infrastructure facilities has shown that ice load calculation standards do not always provide adequate results. When reviewing regulatory methodologies, it is advisable to use automated multivariate analysis. To date, Morstroytekhnologiya LLC has successfully implemented and tested a number of programs for calculating ice loads, taking into account the shape and size of structures, thickness and strength of ice, size of ice fields, and other factors. This article presents information on the technology and results of mathematical modeling of ice conditions during the design of the hydraulic structures in the Luga Bay of the Gulf of Finland, as well as examples of comparisons of ice load calculation methods in domestic and international standards.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, индекс замерзания, толщина льда, прочность льда, ледовые нагрузки, створные знаки.

Keywords: hydraulic structures, freezing index, ice thickness, ice strength, ice loads, leading beacons.

Введение

Одна из главных задач транспортной системы Северо-Западного Федерального округа России — создание, развитие морских портов и выходящих к ним сухопутных коммуникаций, а также комплексов обрабатывающих производств. Для достижения этой задачи первостепенными являются вопросы, связанные с безопасной эксплуатацией гидротехнических сооружений в сложных волновых и ледовых условиях. Необходимы достоверная оценка элементов ветрового, волнового и ледового режима, а также определение нагрузок на ГТС, что невозможно без анализа исторического и современного состояния прирдной среды в Финском заливе.

В настоящее время на берегах Лужской губы построен и продолжает строиться морской торговый порт Усть-Луга. Он является крупнейшим универсальным портом на Балтике (2025 г. — 130,5 млн т) и вторым по величине в России после Новороссийска (2025 г. — 168,0 млн т). Порт входит в пятерку крупнейших портов Европы.

Компанией «Морстройтехнология» в результате выполнения инженерно-гидрометеорологических изысканий в порту Усть-Луга получены достоверные исходные данные и выполнено успешное проектирование операционной акватории перегрузочных комплексов порта, терминала по перевалке минеральных удобрений, контейнерного терминала и др.

В настоящей работе продолжается публикация результатов исследования ледового режима для акваторий портов Российской Федерации [1–3]. Научно-техническая и проектная деятельность авторов связана с оценкой параметров льда и расчетом ледовых нагрузок на разнообразные гидротехнические сооружения.

Материал подготовлен по результатам применения технологии математического моделирования, позволяющей определить характеристики ледового режима в Лужской губе Финского залива в проектных целях, оценить ледовые нагрузки на проектируемые здесь сооружения, а также сопоставить расчетные методики в отечественных и зарубежных нормах.

1. Сведения о площадке и базе исходных данных

Лужская губа располагается в юго-восточной части Финского залива, и она вдается в южный берег Финского залива примерно на 20 км между мысом Кургальский — на западе и мысом Колганов (мыс Колганпя — по навигационным картам) — на востоке. Расстояние между этими мысами около 25 км (рис. 1).



Рис. 1. Схема Лужской губы (<https://map.openseamap.org>)

В качестве базы исходных данных следует использовать глобальные климатические архивы, в которых первичные наблюдения на метеостанциях подвергнуты обработке и приведены к узлам регулярной сетки. При построении сеточных архивов используются различные методы пространственного обобщения, в том числе, пространственную интерполяцию и сложный модельный реанализ.

Современная база данных ретроспективного анализа ERA5 [4] создана в Европейском центре прогноза погоды (ECMWF) с использованием численных моделей прогнозирования погоды в рамках программы «Коперник». Она содержит массивы метеоданных с временным разрешением 1 час и 1 сутки в узлах регулярной сетки $0,25 \times 0,25^\circ$ за период с 1950 г. (архив обновляется в реальном времени).

Для анализа температурного и ледового режима в Лужской губе будем использовать общедоступный сеточный архив на сайте [5] для температуры воздуха. Данный архив после сравнительного анализа точности значений температуры продемонстрировал приемлемую близость к данным наземных наблюдений на станциях государственной наблюдательной сети. Архив [5] уже применялся авторами данной статьи при подготовке монографии [3].

2. Методы анализа ледового режима

2.1. Общие положения

Для получения характеристик ледового режима в Лужской губе использовались методики и алгоритмы, разработанные в ООО «Морстройтехнология» [3].

Реализована серия программ в среде *Microsoft Excel* в виде инструментов для расчета, документирования, сопоставления и графического оформления результатов. Математический и статистический аппараты Excel позволяют производить сложные расчеты для анализа характеристик с различными диапазонами изменения. Вычисления выполняются по стандартным или специально написанным формулам прямо в рабочем листе с пошаговым контролем ошибок в расчетах.

При этом осуществляется фильтрация данных, что ускоряет расчетные процессы, а возможность графического представления результатов позволяет их быстро и качественно анализировать.

Более сложные расчеты проводятся с помощью вычислительных инструментов программы *Visual Basic for Application*. Они могут быть

независимыми объектами, содержащими функции, вызываемые из любого места в электронных таблицах *Excel*.

2.2. Ледовый режим

Основной характеристикой ледового режима для замерзающих аккумуляторов в соответствии с инженерной практикой является индекс замерзания (сумма градусодней мороза) CD , °C, определяемый по формуле

$$CD = FD - K_{FT}TD, \quad (1)$$

где FD — индекс отрицательных температур, °C; TD — индекс положительных температур, °C; K_{FT} — коэффициент, определяемый по данным обработки результатов натуральных наблюдений за толщиной льда на ближайшей станции государственной наблюдательной сети.

Для определения индексов отрицательных FD и положительных TD температур использованы формулы:

$$FD = \sum_{D_S}^{D_E} (T_0 - T_{AF}); \quad (2)$$

$$TD = \sum_{D_S}^{D_E} (T_{AT} - T_0^*), \quad (3)$$

где T_0 и T_0^* — температуры замерзания воды и таяния льда, соответственно, °C; T_{AF} и T_{AT} — среднесуточные температуры воздуха ниже точки замерзания воды и выше точки таяния льда, принимаемые по данным измерений на станциях государственной наблюдательной сети, °C; D_S и D_E — даты устойчивого перехода температуры через 0 °C осенью и весной.

В настоящей работе расчетные толщины льда заданной обеспеченности находятся на основе индексов замерзания CD с учетом результатов верификации по доступным данным натуральных измерений толщин льда на станции ГМС Шепелево.

Толщина льда h_d вычисляется по следующей формуле:

$$h_d = a\sqrt{0,9CD - b}, \quad (4)$$

где a и b — коэффициенты, принимаемые по итогам сопоставления результатов расчетов с данными натуральных измерений толщин льда на ГМС Шепелево.

В соответствии с нормами СП 38.13330.2018 за исходные данные принимаются значения параметров, полученные расчетом по

гидрометеорологическим условиям местности, соответствующие заданной вероятности превышения.

Пределы прочности льда при сжатии R_c , МПа, определяются по следующей формуле:

$$R_c = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i + \Delta_i)^2}, \quad (5)$$

где N — количество слоев одинаковой толщины, на которое разбивается (по толщине) рассматриваемое ледяное поле, при этом $N \geq 3$; C_i — значение прочности льда на одноосное сжатие, МПа; Δ_i — доверительная граница случайной погрешности определения C_i , МПа, в i -ом слое, принимаемые по табл. 15 норм СП 38.13330.2018.

3. Результаты

Годовая средняя толщина льда h_d в зимний период (ноябрь – апрель) в Лужской губе, определенная по формуле (4), составляет 0,26 м, а максимальная — 0,80 м (март).

Сведения об обеспеченных толщинах льда по данным математического моделирования ледовых характеристик с помощью кривых вероятностей Пирсона III рода по месяцам морозного периода приведены в табл. 1.

Таблица 1

Обеспеченные толщины льда h_d , м, для Лужской губы

Вероятность p , %	Ноя	Дек	Янв	Фев	Мар	Апр
0,1	0,38	0,53	0,76	0,83	0,88	0,94
1	0,31	0,48	0,68	0,78	0,83	0,87
10	0,21	0,39	0,56	0,68	0,73	0,74
50	0,10	0,26	0,40	0,51	0,59	0,49

Средняя за зимний период прочность льда R_c в районе Лужской губы, определенная по формуле (5), составляет 1,05 МПа, а максимальная — 4,02 МПа (январь).

Сведения об обеспеченных прочностях льда по данным математического моделирования ледовых характеристик с помощью кривых вероятностей Пирсона III рода по месяцам морозного периода приведены в табл. 2.

Таблица 2

Обеспеченные прочности льда R_c , МПа, для Лужской губы

Вероятность p , %	Ноя	Дек	Янв	Фев	Мар	Апр
0,1	4,11	3,47	3,57	3,46	3,41	3,99
1	3,47	3,41	3,54	3,46	3,37	3,13
10	2,54	3,18	3,42	3,40	3,18	2,03
50	1,29	2,47	2,98	3,01	2,71	0,82

4. Практическое применение результатов

Представленные данные о ледовых условиях могут быть применены при предварительной оценке Лужской губы для размещения, например, светящихся створных знаков. Ниже иллюстрируется применение результатов данного исследования на примере знаков с учетом только ледовых нагрузок.

4.1. Конструкция светящегося знака

Пусть в состав проектируемых сооружений для створа на акватории Лужской губы входит светящийся створный знак. Он включает набор наклоненных под углом около 75° ко дну свай-оболочек, объединенных железобетонным ростверком (рис. 2).

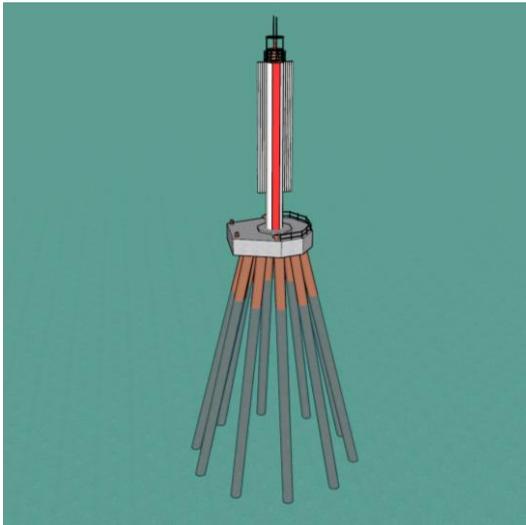


Рис. 2. 3D-вид створного знака

Основными опорными элементами створных знаков являются стальные свай-оболочки из труб $\varnothing 1220$ мм с толщиной стенок 16 мм. Проектный уклон свай-оболочек составляет 4:1; отметка голов — плюс 3,20 м.

4.2. Ледовые нагрузки

Ледовые нагрузки от ровного льда на створный знак по рис. 2 в рамках данной работы в соответствии с нормами СП 38.13330.2018 определялись по данным статистической обработки характеристик природной среды, исходя из обеспеченности характеристик расчетных ледовых условий, равной 0,1 % как для гидротехнических сооружений I класса (см. табл. 1, 2).

Для расчета ледовых нагрузок на створный знак в Лужской губе использовались методики и алгоритмы, разработанные в ООО «Морстрой-технология» [3] и реализованные в виде программ для среды *Microsoft Excel*.

Ледовые нагрузки F_p на отдельно стоящую сваю-оболочку от воздействия движущегося ровного льда будем определять при скорости дрейфа льда V на пересечении графиков для ледовой нагрузки $F_{c,p}$ при остановке ледяного поля и $F_{b,p}$ при прорезании ледяного поля по формулам (50) и (52) из российских норм СП 38.13330.2018.

На рис. 3 в качестве примера приведены графики для нагрузки F_p от ледяного поля с площадью $A = 0,1 \times 0,1$ км² в зависимости от скорости движения льда, например, для марта в Лужской губе при диаметре преграды $d = 1,22$ м.

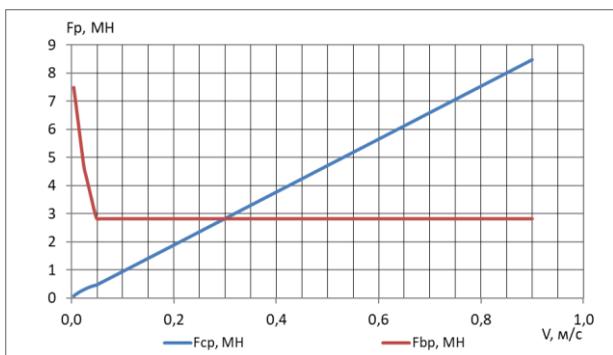


Рис. 3. Графики зависимости ледовых нагрузок от скорости движения ровного ледяного поля V с площадью $A = 0,1 \times 0,1$ км² при диаметре преграды $d = 1,22$ м ($h_d = 0,88$ м, $R_c = 3,41$ МПа, $F_p = 2,8$ МН)

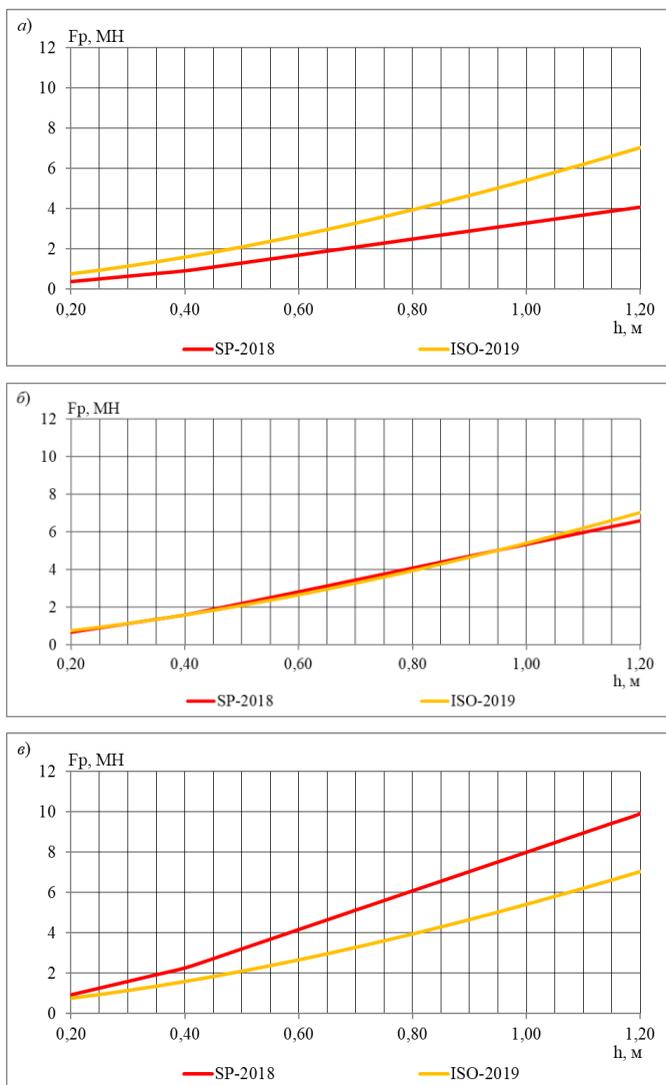


Рис. 4. Графики зависимости ледовых нагрузок от толщины льда на преграду с диаметром $d = 1,22$ м по различным нормам при площади A ледяного поля: а) $0,1 \times 0,1 \text{ км}^2$, б) $1,5 \times 1,5 \text{ км}^2$ и в) $5,0 \times 5,0 \text{ км}^2$

Графики для ледовых нагрузок на преграду с диаметром $d = 1,22$ м в зависимости от толщин льда h_i в диапазоне от 0,20 до 1,20 м при

площади A ледяного поля а) $0,1 \times 0,1$ км², б) $1,5 \times 1,5$ км² и в) $5,0 \times 5,0$ км², построенные по российским нормам СП 38.13330.2018 (SP-2018) и зарубежным нормам ISO 19906:2019 (ISO-2019), приведены на рис. 4, а, б и в, соответственно.

4.3. Анализ результатов расчета ледовых нагрузок по различным странам

Как видно из графиков (см. рис. 4), расчеты по российским и зарубежным нормам для цилиндрических опор при разных размерах ледяных полей дают различные ледовые нагрузки. При относительно небольших размерах ледяных полей зарубежные нормы ISO-2019 превышают ледовые нагрузки — для принятых исходных данных на 61 %.

С увеличением размеров полей картина изменяется в обратную сторону. При плановых размерах около 1,5 км ледовые нагрузки по ISO-2019 и SP-2018 практически совпадают, а при размерах полей более 5 км нагрузки по российским нормам SP-2018 существенно превосходят нагрузки по зарубежным нормам ISO-2019 (для принятых исходных данных на 52 %).

В результате сравнения можно сделать вывод о принципиальном превосходстве норм СП 38.13330.2018 над нормами ISO 19906:2019. Российские нормы позволяют учитывать влияние размеров ледяных полей на ледовые нагрузки. Зарубежные нормы недостаточно гармонизированы с российскими нормами, и потому не рекомендуются к применению в проектной практике на территории России, но могут применяться для верификации расчетных результатов.

Заключение

1. С помощью прогнозных расчетов характеристик ледового режима в районе расположения створа на акватории Лужской губы определены исходные данные по расчетным толщинам и прочностям ровного льда.

2. По полученным данным определены ледовые нагрузки от ровного льда на опоры створного знака в Лужской губе Финского залива, учет которых обеспечит надежную и безопасную работу сооружений.

3. При определении ледовых нагрузок на опоры проанализированы результаты применения расчетных методик из нормативных документов разных стран, сделан вывод о существенных преимуществах методик отечественных норм СП 38.13330.2018 перед зарубежными аналогами.

Список литературы

1. Горгуца П. Ю. Характеристики ледового режима для расчета нагрузок на сооружения в Обской губе (на примере пирса Салмановского НГКМ) / П. Ю. Горгуца, М. Е. Миронов // В сб.: Гидравлика и гидромеханика гидротехнических сооружений. Сборник материалов научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Мелконяна Георгия Ивановича. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2023. – С. 157–169. <https://elibrary.ru/item.asp?id=59744661>.

2. Горгуца П. Ю. Расчет ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения на примере морского портового комплекса в Татарском проливе / П. Ю. Горгуца, М. Е. Миронов // Гидротехника. – 2023. – № 3 (72). – С. 15–21. <https://elibrary.ru/item.asp?id=54385040>.

3. Горгуца П. Ю. Природная среда и ледовые нагрузки (на примере Обской губы): монография / П. Ю. Горгуца, М. Е. Миронов – СПб.: Политех-Пресс, 2025. – 184 с.

4. H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, et al., The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society – 2020. – Vol. 146 (730). – P. 1999–2049. (На англ. яз.). <http://dx.doi.org/10.1002/qj.3803>.

5. ECMWF|Advancing global NWP through international collaboration. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ecmwf.int> (дата обращения: 30.01.2026).