

К расчету ледовых нагрузок (на примере сооружений Карского моря)

Автор: Миронов М.Е., д.т.н., проф., главный специалист*

* ООО «Морстройтехнология» (МСТ), г. Санкт-Петербург, Россия

- **ООО «Морстройтехнология» (МСТ)** специализируется на исследованиях и проектировании в области морского транспорта, главным образом, морских портов и терминалов, гидротехнических сооружений, мультимодальных логистических центров и других объектов транспортной инфраструктуры.
- В среднем компания ведет порядка **30-40 проектов** по всей России и получает **6-8 положительных заключений** Главгосэкспертизы в год.

Наши сотрудники:

Всего в штате МСТ более **160**

человек,

из них:

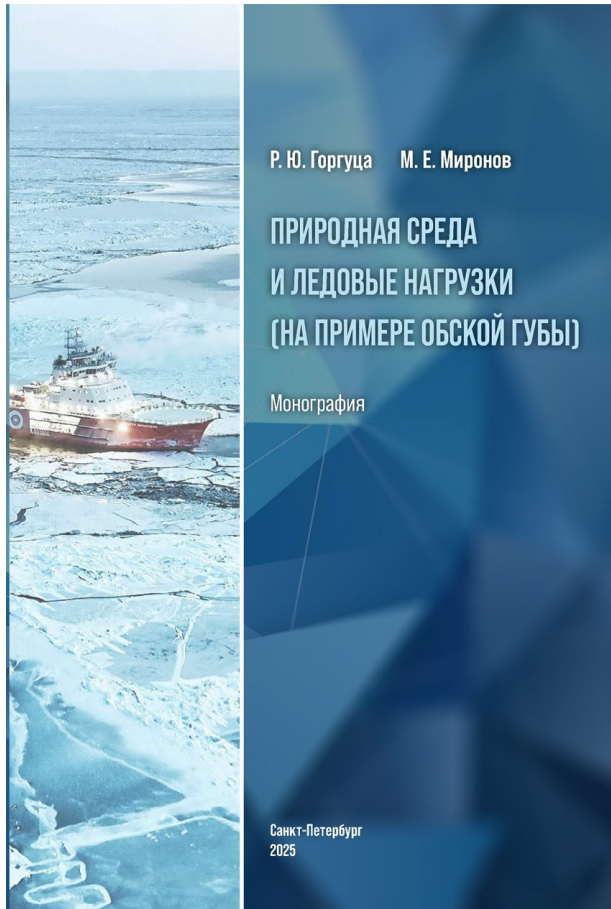
- 1 академик
- 2 доктора наук
- 7 кандидатов наук
- В компании работают выпускники 48 различных ВУЗов
- 26 сотрудника компании закончили ВУЗы с отличием
- 5 сотрудников имеют государственные награды

В МСТ разработана технология математического моделирования характеристик природной среды, позволяющая обоснованно определять характеристики метеорологического, ледового и др. режимов в проектных целях, а также рассчитывать ледовые нагрузки на ГТС, путем введения изменений к требованиям действующего нормативного документа [СП 38.13330].

Эти изменения затрагивают как нормативные методики по назначению расчетных характеристик метеорологического и ледового режима, так и методики по определению ледовых нагрузок на различные ГТС.

Для расчетов разработана серия программ в среде *Microsoft Excel*, и они являются удобным инструментом для документирования, сопоставления и графического оформления информации. Программы позволяют производить сложные режимные расчеты для анализа изменчивости характеристик за различные временные отрезки.

С помощью электронных таблиц *Excel* вычисления могут выполняться по стандартным или специально разработанным расчетным формулам и функциям прямо в рабочем листе с возможностью наглядного пошагового контроля наличия ошибок в расчетах.



Горгуца Р.Ю. Природная среда и ледовые нагрузки (на примере Обской губы): монография / Р.Ю. Горгуца, М.Е. Миронов. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 184 с.

В монографии приведены сведения о технологии и результатах математического моделирования элементов метеорологического и ледового режима при проектировании гидротехнических сооружений в Обской губе Карского моря. Рассмотрены примеры верификации математических моделей натурными и лабораторными данными, продемонстрированы примеры расчета элементов метеорологического и ледового режима, ледовых нагрузок для Обской губы с использованием конкретных условий для различных сооружений.

Монография предназначена для инженерно-технических работников, занятых проектированием и строительством в водной среде в условиях Арктики.

Залив Шарапов Шар – район возможного расположения искусственных островов в Карском море

а)



б)



Обзорная схема Карского моря (а) и залива Шарапов Шар с контурами сооружений (б)

Индекс замерзания и толщина льда

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

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

где FD – индекс отрицательных температур, °С; TD – индекс положительных температур, °С; K_{FT} – коэффициент, определяемый по данным обработки результатов натуральных наблюдений за толщиной льда на ближайшем гидрологическом посту с достаточно продолжительным периодом ледовых измерений.

Для определения индексов отрицательных FD и положительных TD температур должны использоваться 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, °С; T_{AF} и T_{AT} – среднесуточные температуры воздуха ниже точки замерзания воды и выше точки таяния льда, соответственно, принимаемые, например, по данным измерений на станциях государственной наблюдательной сети, °С; D_S и D_E – даты устойчивого перехода температуры через 0°С осенью и весной.

Толщина льда h_d определяется 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 выбранной станции.

Прочность льда

Прочность льда по российскому своду правил [СП 38.13330] определяется путем статистической обработки данных измерений пределов прочности льда для образцов с определенными размерами. Однако определение физико-механических характеристик льда, в том числе, прочности льда, не входит в состав стандартных ледовых наблюдений, осуществляемых на береговых гидрометеорологических станциях.

В связи с отсутствием данных измерений прочности льда в период ледовых воздействий в соответствии с нормами за исходные данные принимаются значения параметров, полученные расчетом по гидрометеорологическим условиям местности, соответствующие заданной вероятности превышения.

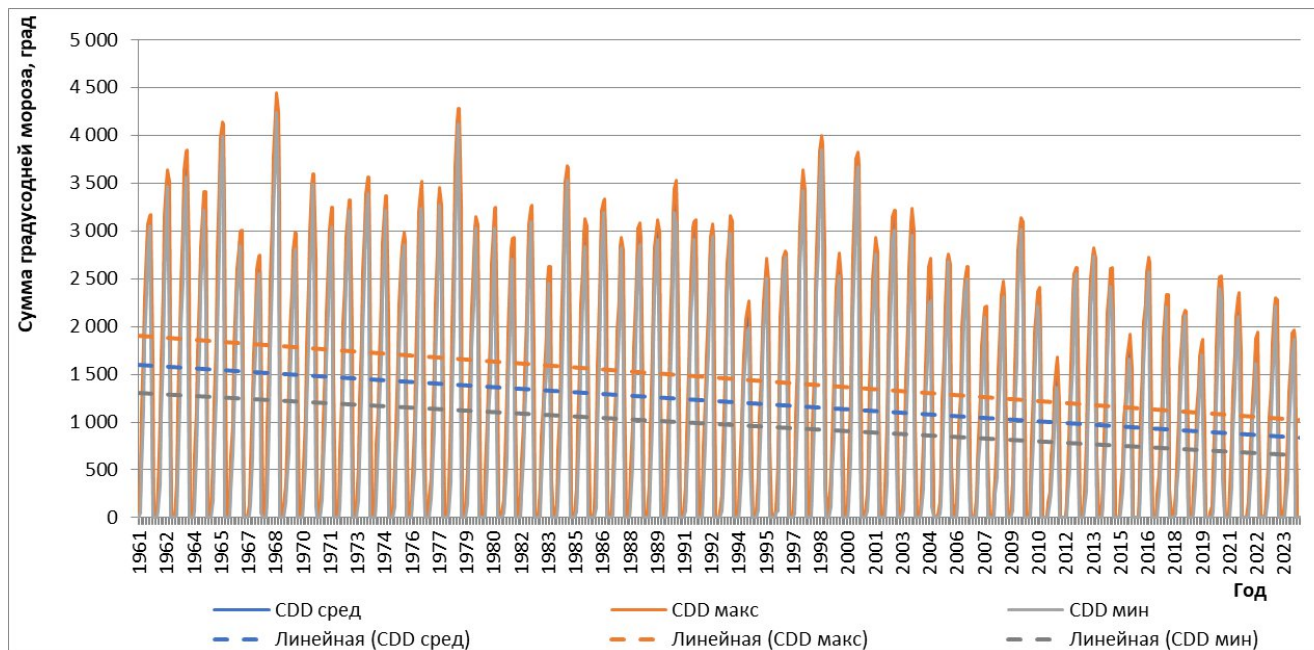
Предел прочности льда при сжатии R_c , МПа, определяется по следующей формуле

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

где N – количество слоев одинаковой толщины, на которое разбивается (по толщине) рассматриваемое ледяное поле, при этом $N \geq 3$; C_i – прочность льда на одноосное сжатие, МПа, в i -ом слое, при температуре t_i ; Δ_i – доверительная граница случайной погрешности определений C_i , МПа, принимаемые по табл. 14, 15 норм [СП 38.13330].

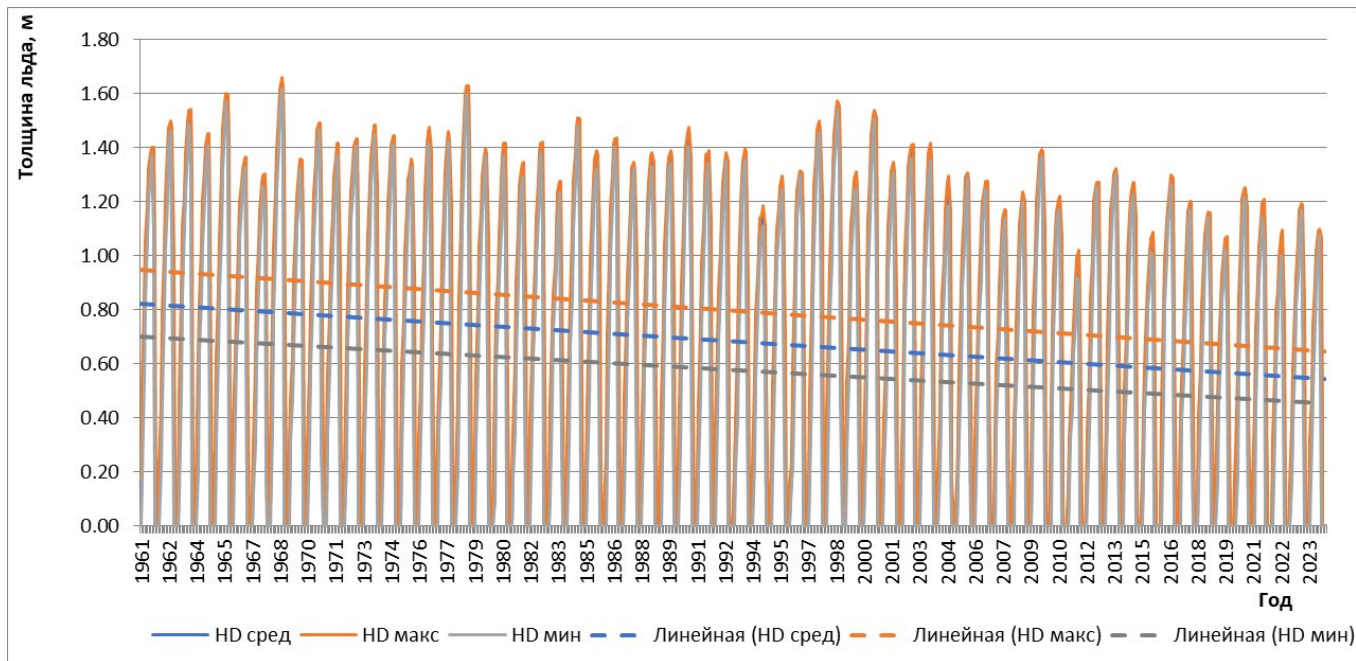
Индекс замерзания CD – залив Шарапов Шар

Число	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Средние значения (10.1961 - 9.2025)												
Средн.	1216	1804	2325	2735	2915	2265	434	1	0	26	232	643
Абсолютные экстремумы (10.1961 - 9.2025)												
Высш.	2494	3132	3783	4221	4446	4277	3310	280	0	297	972	1719
Низш.	290	661	910	1360	972	0	0	0	0	0	0	59

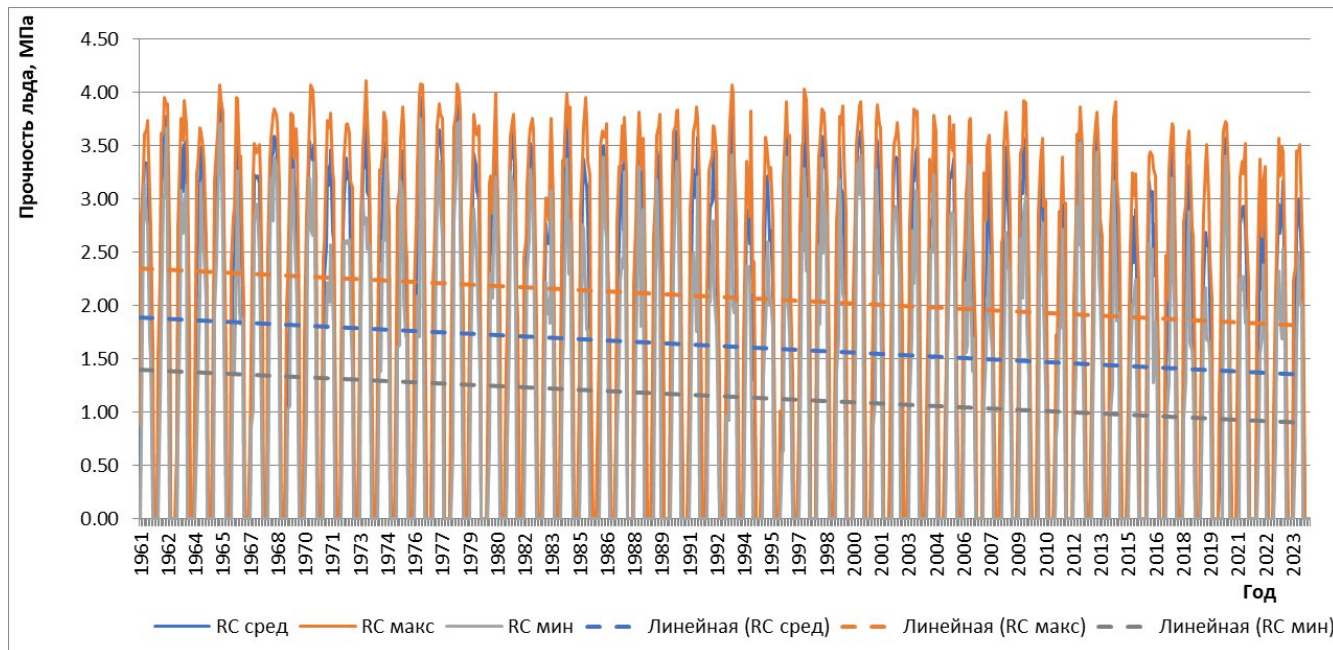


Толщина ровного льда Hd – залив Шарапов Шар

Число	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Средние значения (10.1961 - 9.2025)												
Средн.	0.86	1.05	1.19	1.29	1.33	1.13	0.31	0.00	0.00	0.08	0.35	0.61
Абсолютные экстремумы (10.1961 - 9.2025)												
Выш.	1.24	1.39	1.53	1.61	1.66	1.63	1.43	0.42	0.00	0.43	0.77	1.03
Низш.	0.42	0.64	0.75	0.92	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19



Число	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Средние значения (10.1961 - 9.2025)												
Средн.	3.15	3.29	3.17	2.85	1.92	0.21	0.00	0.00	0.00	0.47	1.83	2.58
Абсолютные экстремумы (10.1961 - 9.2025)												
Вышш.	3.97	4.11	4.07	3.89	3.45	2.00	0.00	0.00	0.00	2.50	3.40	3.68
Низш.	1.28	1.68	1.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Период становления припая (октябрь-ноябрь)

- толщина и прочность ледяных полей в заливе Шарапов Шар таковы, что их движения практически не ограничены из-за отсутствия прочной связи с берегом и быстрой реакции на действие ветра;

Период неподвижного припая (декабрь-май)

- массовые движения ледяных полей практически невозможны из-за наличия прочной связи припая с берегом и пренебрежимо малой реакции на действие ветра при колебаниях уровня воды;
- в связи с отсутствием зимнего судоходства в припае у берегов залива Шарапов Шар появление полос тонкого льда в виде замерзших трещин и судоходных фарватеров, в направлении которых возможны смещения окруженных этими трещинами и фарватерами ледяных полей, маловероятно;

Период разрушения припая (июнь-июль)

- имеет место давление расположенных в центральной части залива Шарапов Шар дрейфующих льдов на припай у берегов;
- скачки температуры наружного воздуха приводят к термическим деформациям, усиливающим напряжения в припае;
- приведенные факторы способствуют отрыву припая от берегов залива Шарапов Шар с последующим движением образовавшихся ледяных полей в произвольном направлении.

Обеспеченные толщины льда H_d , м

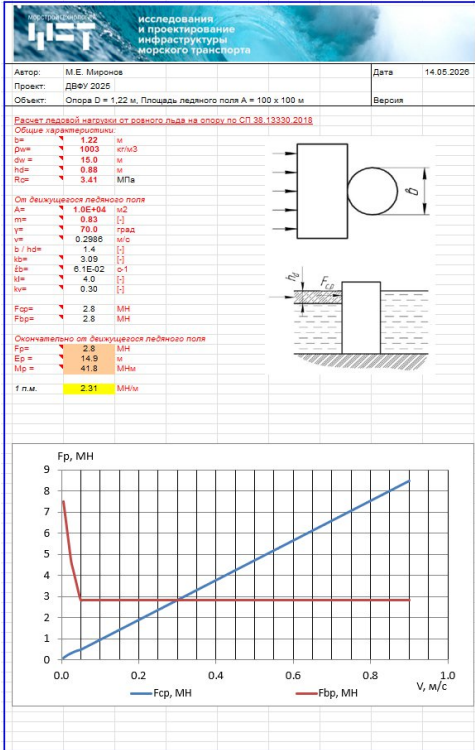
Вероятность p , %	ЯНВ	ФЕВ	МАР	АПР	МАЙ	ИЮН	ИЮЛ	АВГ	СЕН	ОКТ	НОЯ	ДЕК	ГОД
0,1	1.23	1.38	1.52	1.61	1.65	1.62	0.00	0.00	0.00	0.42	0.77	1.02	1.64
1	1.16	1.32	1.47	1.58	1.64	1.61	0.00	0.00	0.00	0.38	0.68	0.93	1.56
10	1.01	1.20	1.34	1.46	1.49	1.44	0.00	0.00	0.00	0.29	0.53	0.78	1.38
50	0.87	1.05	1.20	1.29	1.35	1.22	0.00	0.00	0.00	0.15	0.35	0.62	1.01

Обеспеченные прочности льда R_c , МПа

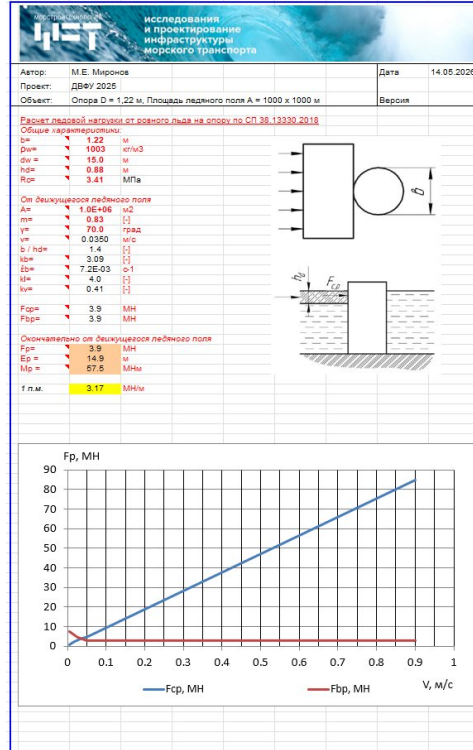
Вероятность p , %	ЯНВ	ФЕВ	МАР	АПР	МАЙ	ИЮН	ИЮЛ	АВГ	СЕН	ОКТ	НОЯ	ДЕК	ГОД
0,1	3.92	4.08	4.04	3.88	3.36	2.00	0.00	0.00	0.00	2.48	3.36	3.64	4.04
1	3.80	4.04	3.92	3.76	3.20	1.92	0.00	0.00	0.00	2.36	3.24	3.52	3.88
10	3.64	3.80	3.76	3.56	2.72	1.80	0.00	0.00	0.00	1.88	2.76	3.32	3.60
50	3.24	3.40	3.28	2.92	2.08	1.48	0.00	0.00	0.00	0.96	1.92	2.76	2.72

Ледовые нагрузки на опоры от ровного дрейфующего льда - расчет

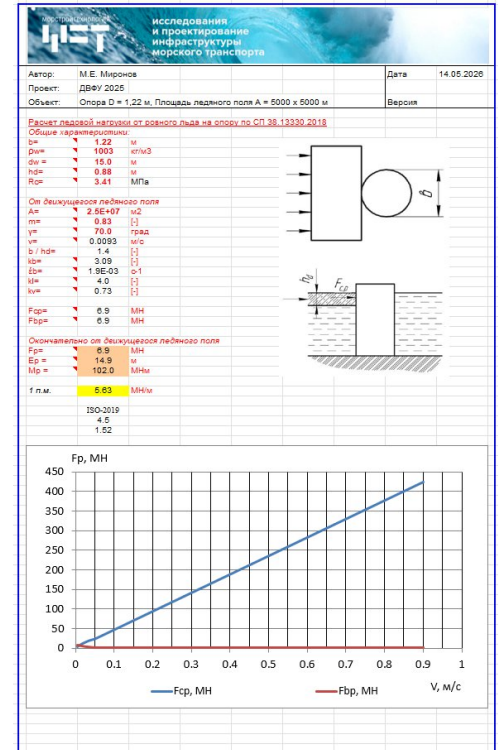
а)



б)

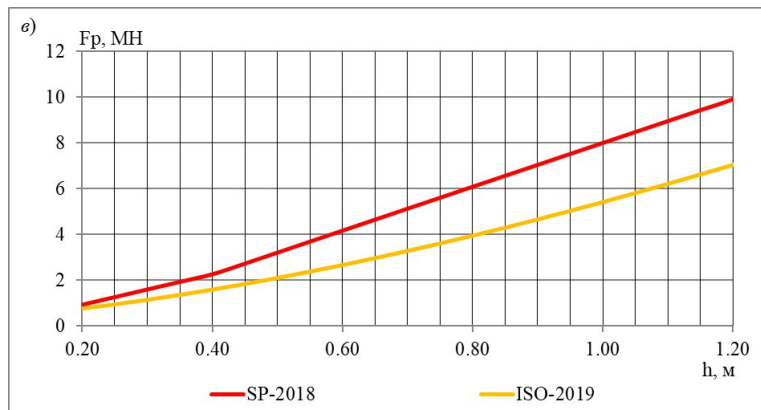
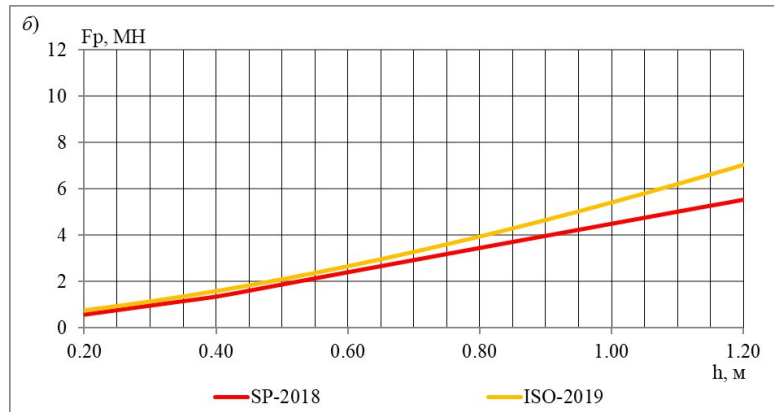
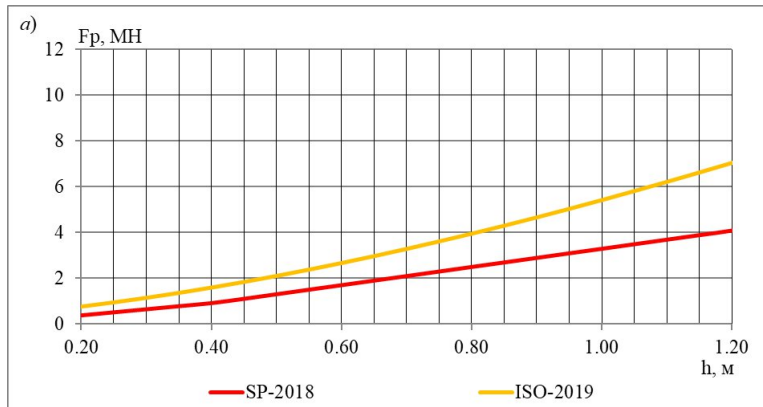


в)



Расчеты ледовых нагрузок - площади ледяного поля:

а) A1 = 100 x 100 м; б) A2 = 1000 x 1000 м; в) A3 = 5000 x 5000 м



Графики для ледовых нагрузок по различным нормам - площади ледяного поля:
а) A1 = 100 x 100 м; б) A2 = 1000 x 1000 м; в) A3 = 5000 x 5000 м

1. С помощью прогнозных расчетов характеристик ледового режима в районе расположения сооружений на акватории залива Шарапов Шар определены недостающие для проектирования исходные данные по расчетным толщинам и прочностям ровного льда.
2. По полученным данным в соответствии с действующей нормативной базой определены ледовые нагрузки от ровного льда на опоры технологического причала в заливе Шарапов Шар Карского моря, обеспечивающие надежную и безопасную работу морских сооружений.
3. При определении ледовых нагрузок на опоры проанализированы результаты применения расчетных методик из нормативных документов ряда стран, сделан вывод о существенных преимуществах методик отечественных норм СП 38.13330.2018 перед зарубежными аналогами.

Спасибо за ВНИМАНИЕ

- Миронов Михаил Евгеньевич
- Главный специалист гидротехнического отдела
- mmironov@morproekt.ru
- [+7 \(999\) 519 6172](tel:+79995196172)

