ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТАЯЩЕГО ЛЕДОВОГО ОСТРОВА С УЧЁТОМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЛЬДА

В.И. Голубев, **Е.К. Гусева**, И.Б. Петров

МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный

guseva.ek@phystech.su

Активное развитие Арктического региона, богатого запасами полезных ископаемых, привело к появлению новых перспективных технологий развития инфраструктуры для разработки месторождений. Одной из подобных технологий является сезонное возведение искусственных ледовых островов в качестве нефтяных платформ и площадок для проведения геологоразведочных работ и исследований [1]. Использование подобных конструкций приводит к необходимости оценки их стойкости под воздействием температурных и механических воздействий. Для учёта таяния льда при наличии тепловых потоков от тёплых течений воды и воздуха ранее была поставлена и решена задача Стефана в работах [2, 3]. К тому же, были проведены предварительные оценки не разрушения льда под нагрузкой от веса буровой установки, однако, без учёта влияния температуры на прочностные свойства льда.

В рамках продолжения исследований используемая автором [3] двумерная постановка задачи была усовершенствована с помощью введения экспериментально полученных зависимостей характеристик льда от температуры [4–7]. В работе проведена серия расчётов для различных площадей приложения нагрузки. Целью исследования ставится определение минимальных значений нагрузки, при которых разрушается лёд, а также выделение характерных зон разрушения льда. Для этого решается задача установления, в которой используется динамическая определяющая система уравнений линейной изотропной теории упругости и достаточно большое время расчёта, гарантирующее затухание возникающих под нагрузкой волн и устремляющее задачу к статике. Строится модель акватории Арктических

морей, состоящая из ледового острова, окружённого водой, стоящего на смягчённом морском грунте, под которым расположен более жёсткий слой породы. Считается, что остров (поперечным размером 300 м и высотой 10 м) был построен в январе, и его период эксплуатации заканчивается в августе. В работе учитывается изменение его геометрии и рассчитанные температурные профили в конце каждого месяца.

Макет расчётной области и температурные профили приведены на рис. 1. Результаты расчётов показывают, что таяние льда происходит, в основном, на контакте с водой для 1–5 месяцев. Значительное понижение температуры вблизи верхней поверхности льда начинается в летний период (6–8 месяцы). Для каждой части расчётной области генерируются криволинейные подвижные сетки, в каждом узле которых сохраняются соответствующие упругие параметры. Пространственный шаг в острове (0) вдоль вертикального направления, h_1, колебался от 0.04984 м до 0.04985 м, вдоль горизонтального, h , – от 0.35 м до 1.2 м. Упругие и сеточные параметры остальных слоёв приведены в Таблице 1. Между сетками ставится контактное условие полного слипания, верхняя граница считается свободной, боковые стороны – неотражающие. Расчёты проводились с временным шагом в 10 мкс до момента появления первых разрушений или до 0.2 с, когда амплитуда волновых процессов значительно снижается. Вычисления проводились с помощью сеточно-характеристического метода и монотонизированной схемы третьего порядка аппроксимации [8].

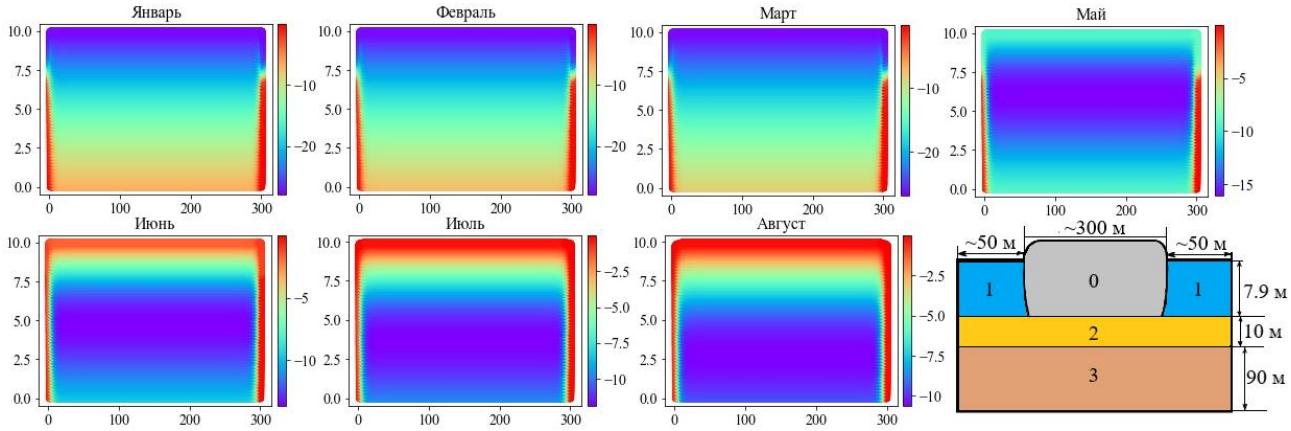

Рис. 1. Температурные профили в ледовом острове в конце каждого месяца и схема расчётной области.

Таблица 1: Упругие и сеточные характеристики слоёв.

№	Слой	, м	, м	, м/с	, м/с	ρ, кг/м^3
1	Вода	0.04984-0.04985		1500	1	1000
2	Морское дно	1	0.35-1.2	1806	316	2500
3	Нижний грунт	1	0.35-1.2	2250	1000	2500

Для учёта нелинейного поведения льда и температурной зависимости его свойств используется вязкоупругая модель льда с разрушением. Упругие параметры льда рассчитывались по формуле Берденникова:

Па [4], где отношение солёности льда

‰ и солёности рассола S_p полагается равным $S/S_p = 0.25$, температура T соответствует рассчитанным профилям в конце каждого месяца. Коэффициент Пуассона льда равнялся $\nu = 0.295$, плотность вычислялась как

кг/м3 [5]. Прочность льда оценивалась согласно формуле $k = 1.76\exp\left(-5.88\sqrt{v_b}\right)$ МПа [6], полученной на основе аппроксимации обширного объёма экспериментальных данных. Здесь массовая доля v_b определялась согласно зависимости Франкенштейна-Гарнера v

‰ [7]. Вязкоупругое поведение льда реализовано с помощью модели Максвелла с характерным для льда временем релаксации в 2 мс. Зоны разрушенного льда определялись согласно критерию фон Мизеса ($0.5s_{ij}s_{ij} - k^2 > 0$, s_{ij} – девиатор тензора напряжений) [9]. В разрушенных узлах сетки реализовывалась пластичность, то есть производилась постоянная коррекция напряжений для возврата на поверхность текучести.

В качестве нагрузки в центре острова на верхней поверхности ставилось условие постоянной силы на протяжении 5, 10, 25, 50, 75, 100 и 150 м. Основное разрушение происходило в окрестности зоны приложения нагрузки, а также на тыльной поверхности острова непосредственно под этой зоной. Величина нагрузки варьировалась для определения минимальных значений, при которых начинается разрушение льда. Найденные оценки для каждого месяца изображены на рис. 2. Важно отметить, что лёд считался разрушенным даже при разрушении одного узла расчётной области, что на практике не должно приводить к существенной потери несущей способности данной конструкции. Таким образом, приведённые оценки представляются обоснованно заниженными.

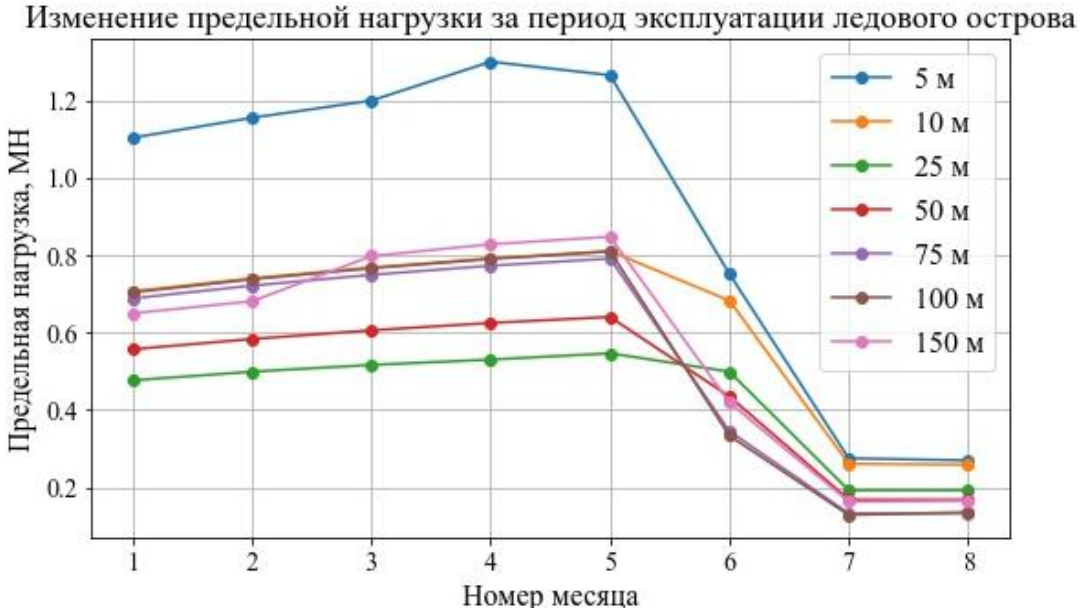

Рис. 2. Предельная нагрузка, полученная в каждый месяц.

На графике видно, что наиболее прочным лёд оказывается, в основном, в конце мая, что в полевых условиях соответствует концу зимы, когда естественные ледяные образования заканчивают своё формирование и обладают наибольшей прочностью. В летний период с июня по август лёд тает наиболее активно, температура вблизи его поверхности растёт, что приводит к уменьшению его прочности и, соответственно, меньшей стойкости. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости разгрузки или прекращения эксплуатации острова в летний период.

При увеличении зоны приложения нагрузки с 5 до 25 м величина предельной нагрузки значительно уменьшается в зимние и весенние месяцы, однако затем немного возрастает и практически не меняется. В летние месяцы эта величина уменьшается незначительно. Если предположить, что на острове возводится некоторое здание или исследовательский комплекс, который своим весом воздействует на лёд с давлением примерно равным 2 кПа, то остров выдержит подобные воздействия только в случае малой протяжённости этой конструкции (10 м и менее). Таким образом, можно заключить, что хотя остров может выдержать вес буровой установки и небольших зданий, возводить сложную и масштабную инфраструктуру может быть опасно.

В результате настоящей работы методами численного моделирования была решена задача установления для определения устойчивости тающего ледового острова под воздействием механических воздействий от конструкций различного размера. Полученные значения предельной нагрузки могут использоваться в качестве ориентировочных оценок изменения прочности ледовых островов в процессе их эксплуатации. Предложенный подход к моделированию может применяться для построения цифровых двойников подобных платформ. В качестве направления дальнейшего исследования можно указать использование более точных температурных профилей во льду, а также проведение трёхмерных расчётов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-11-00035.

Список литературы:

1. C-CORE. Ice Island Study. Final Report. Prepared for Minerals Management Service, US Department of the InteriorReport No. R-05-014-241 v1.0, 2005.
2. Muratov M.V., Stognii P.V., Konov D.S., Petrov I.B. Numerical modeling of elastic and thermal dynamical processes in artificial ice island // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. 2021.
3. Golubev V.I., Muratov M.V., Guseva E.K., Konov D.S., Petrov I.B. Thermodynamic and Mechanical Problems of Ice formations: Numerical simulation results // Lobachevskii J. Math. 2022. Vol. 43. Issue 4. Pp. 970–979.
4. Берденников В.П. Изучение модуля упругости льда // Труды ГГИ. 1948. Т. 7. № 61. С. 13–23.

5. Назинцев Ю.Л., Панов В.В. Фазовый состав и теплофизические характеристики морского льда // Фазовый состав и теплофизические характеристики морского льда – Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2000. 84 с.
6. Ince S.T., Kumar A., Paik J.K. A new constitutive equation on ice materials // Ships Offshore Struct. 2017. Vol. 12. Issue 5. Pp. 610–623.
7. Frankenstein G., Garner R. Equations for Determining the Brine Volume of Sea Ice from −0.5° to −22.9°C // Journal of Glaciology. 1967. Vol. 6. Issue 48. Pp. 943–944.
8. Guseva E.K., Golubev V.I., Petrov I.B. Linear, Quasi-Monotonic and Hybrid Grid-Characteristic Schemes for Hyperbolic Equations // Lobachevskii J. Math. 2023. Vol. 44. Pp. 296–312.
9. Bruhns O.T. The Prandtl-Reuss equations revisited // Z. Angew. Math. Mech. 2014. Vol. 94. Issue 3. Pp. 187–202.