

УДК 551.321.8:551.326.7

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРОСООБРАЗОВАНИЯ

© 2026 г. В. В. Харитонов^{1,*}, Р. И. Май^{1,2}, В. А. Бородкин¹

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: kharitonov@aari.ru

Поступила 21.10.2025 г.

После доработки 03.12.2025 г.

Принята к печати 23.03.2026 г.

Процесс формирования тороса под давлением моделировался с помощью двумерного стенда. Цель работы – наблюдение за движением полипропиленовых пластинок, имитирующих ледяные блоки, относительно друг друга в процессе моделирования формирования тороса. Основная идея стенда заключается в том, чтобы ограничить перемещение блоков-имитаторов льда только в вертикальной плоскости. Эта плоскость создаёт иллюзию поперечного сечения тороса. Рассмотрены конструкция стенда и методика моделирования. Процесс фиксировался видеокамерой. С помощью технологии компьютерного зрения проводился анализ каждого кадра на основе операций с векторными полигонами. В результате обработки изображений зафиксировано 20 морфометрических параметров строения тороса, среди которых: ширина паруса, ширина кия, координаты верхней точки паруса, координаты нижней точки кия, парус, киль, площадь блоков, распределение пористости по горизонтали и по вертикали, положение барицентров и т.д. Полученные модельные профили поперечного сечения были сравнены с реальными поперечными сечениями торосов. Результаты вполне удовлетворительные; это говорит о том, что моделирование адекватно отражает формирование реальных торосов. Увеличение осадки модельного тороса пропорционально корню квадратному из общей площади блоков, задействованных в эксперименте, с коэффициентом 0.8. Внедрение блоков в формирующийся торос происходит как сверху в виде наслоения, так и внутрь кия в виде “струй”. В дальнейшем блоки под действием силы тяжести смещаются вниз, образуя некое подобие завихрения, тем самым определяя преимущественный сценарий торошения. Согласно второму сценарию, который можно назвать сценарием “примыкания”, накопление новых блоков происходит на краю сформировавшегося кия, наслоения и последующих завихрений не происходит. Торошение по второму сценарию происходит гораздо реже, примерно в 20% экспериментов. На данный момент нет ясности в причинах торошения по тому или другому сценарию.

Ключевые слова: торошение, стенд для моделирования, модельный торос, видеоизображение, осадка кия, морфометрический параметр, сценарий

DOI: 10.7868/S2412376526020107

ВВЕДЕНИЕ

Торос представляет собой хаотическое холмообразное нагромождение обломков морского льда со сложным внутренним строением, образовавшееся в результате сжатия, находящееся на плаву и частично или полностью смёрзшееся. Первая компьютерная модель процесса торошения была разработана Р. Пармертером и М. Куном (Parmerter, Coon, 1972). М. Хопкинс предложил другую динамическую модель фор-

мирования тороса, в которой тонкий лёд замёрзшего разводья сталкивается с толстым многолетним льдом (Hopkins, 1994, 1998).

Физическое моделирование торосов начинал ещё В.П. Афанасьев (1971), который использовал парафиновые пластинки, свободно насыпанные на горизонтальную поверхность. Известен способ образования искусственных торосов (Vershinin et al., 1980). Его суть в том, что в ледяном поле делают прорезы в виде лотка, по боковым сторо-

нам которого устанавливают ограждения, а затем сдавливают в продольном направлении внутреннюю часть лотка до образования тороса. Недостаток данного способа – высокая трудоёмкость и из-за этого невозможность многократного повторения опытов. Эксперименты по определению прочностных свойств моделей торосов описаны в (Alekseyev et al., 2001). Напиленные или наломанные обломки льда, соотношение сторон которых соответствует натурным обломкам в торосах, засыпаются в сдвиговый прибор. Нагрузка на сдвиговый прибор передаётся домкратами. Во время экспериментов фиксируются давление в гидросистеме и перемещение домкратов, скорость перемещения. Однако они моделируют прочностные свойства торосов без их морфометрических параметров. Моделирование торошения проводилось в лабораторных условиях в теплоизолированном бассейне размерами 3×1 и 1×0.6 м (Tyshko, 2009). Намороженное ледяное поле распиливалось поперёк на три части, одна из крайних частей служила препятствием для создания ледяных нагромождений при сжатии двух других с помощью домкрата. Это один из эффективных способов моделирования торосов, но для неоднократного повторения опытов требуется длительное время для намораживания льда.

Широкую известность получили ледовые опытовые бассейны, предназначенные для экспериментальных исследований механики деформации и разрушения морского льда (AARI..., 2025; Krylov-Centre..., 2025). В них проводятся исследования процессов и сценариев разрушения ледяного покрова при взаимодействии с судами и инженерными сооружениями. Моделирование в ледовых бассейнах также очень трудо- и энергоёмко, т.к. изготовление лабораторного льда в ледовом бассейне требует чрезмерно больших затрат времени и ресурсов, в первую очередь энергетических.

Оригинальное моделирование торошения и образования заторов описано в (Buzin, 2016). Используемый в этих экспериментах стенд в виде модели рельефа русла и поймы участка реки Лена протяжённостью 68 м выполнен из уплотнённого песка с последующим цементированием поверхностного слоя толщиной 2–3 см. В качестве модельного материала-имитатора льда применён полиэтилен. В экспериментах льдины представлены в виде квадратных пластин с длиной стороны 5, 10 и 20 см и толщиной 0.5 и 0.6 см, что соответствует натурным размерам льдин. Размеры льдин выбирались таким образом, чтобы в целом

на модели воспроизводилась картина, соответствующая натурному ледоходу. Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. На чистую воду подавался имитатор льда в один слой. После этого он освобождался от удерживающего устройства, и начиналось свободное движение массива имитатора льда по чистой воде вниз по течению. Процесс движения имитатора льдин и формирования заторов снимался на фото- и видеокамеры. Неизвестно, как производилась обработка изображений, к тому же в этих экспериментах нет возможности наблюдения перемещения блоков внутри затора.

Фактически до сих пор нет чёткого представления, как же перемещаются блоки взломанного льда при торошении, и стоит задача – найти подходы к разрешению этой проблемы. Об актуальности этой проблемы говорит большое количество публикаций о ледовых нагрузках на гидротехнические сооружения, создаваемых торосами. Моделирование торошения, о котором говорится в данной статье, изначально было призвано прояснить картину, как распределяются блоки льда на поперечном сечении тороса, какова динамика процесса торошения. Достаточно вспомнить картинку в ряде публикаций, изображающие киль тороса и не имеющие ничего общего с реальностью. Результаты моделирования имеют научную значимость с точки зрения систематизации знаний о торосах вообще, и в частности о процессах их формирования.

КОНСТРУКЦИЯ СТЕНДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТОРОШЕНИЯ

Основная идея стенда заключается в ограничении движения блоков-имитаторов льда в одной вертикальной плоскости. Эта плоскость позволяет рассматривать имитацию поперечного среза тороса сбоку, перпендикулярно его гребню. В качестве имитатора льда выбран полипропилен – материал, плотность которого соответствует плотности морского льда. Все блоки представляют собой параллелепипеды разного размера, но одинаковой толщины 8 мм. Длинная сторона блоков соответствует натурной ширине, а ширина – толщине ледяных обломков в “парусах” реальных торосов (Guzenko et al., 2022). За основу стенда взят бытовой аквариум размером $1500 \times 600 \times 300$ мм. Длина стенда в сто, а высота – в пятьдесят раз превышают минимальный размер блока-имитатора льда. Внутри аквариума, параллельно лицевой стенке, на расстоянии 9–12 мм установлена перегородка черного цвета. Между перегородкой

и боковыми стенками аквариума оставлены зазоры шириной 100 мм. Внутри стенда залита вода на глубину примерно $\frac{3}{4}$ высоты аквариума.

Согласно гистограмме, приведённой в (Guzenko et al., 2022), отношение ширины блоков к толщине имеет максимум при значении 2. Причём гистограмма показывает максимальную частоту случаев в диапазоне от 1 до 3 для этого отношения. Поэтому в наших экспериментах применяется отношение ширины и длины блоков от 1.5×1.5 до 4.5×1.5 см.

Моделирование торошения на стенде реализуется следующим образом. Через боковые зазоры блоки-имитаторы льда последовательно, друг за другом, помещаются с обеих сторон между перегородкой и лицевой стенкой в горизонтальном, плавающем положении. Под действием внешних горизонтальных усилий с одной или двух сторон обе последовательности блоков, имитирующие ровный лёд или сморозь, перемещаются в сторону центральной части стенда. В центре происходит столкновение выстроившихся в линию блоков. За счёт неидеальной формы блоков в некоторых местах возникают поперечные усилия, и происходит смещение отдельных блоков в поперечном направлении. Продолжение процесса приводит к нагромождению блоков, имитирующему торос. Варьирование размеров блоков и последовательности их употребления в экс-

перименте приводит к различным ситуациям с имитацией торошения. Светлые блоки на фоне чёрной перегородки создают контрастное изображение. На рис. 1 приведён снимок стенда, иллюстрирующий моделирование торошения. На лицевую сторону стенда нанесены вертикальная и горизонтальная шкалы. Для имитации торошения у стенки (у борта судна или гидротехнического сооружения) с одной стороны в зазоре между лицевой стенкой и перегородкой может быть установлена и закреплена под нужным углом ограничивающая консоль.

Отмечены следующие недостатки стенда: блоки имитируют уже взломанный лёд; смоченные блоки, скользя по стеклянным поверхностям в зоне выше уровня воды, удерживаются силами поверхностного натяжения и иногда зависают. Особенно это происходит с небольшими блоками из-за их малого веса; из-за прямоугольной формы блоков они иногда выстраиваются в линию и упираются в стенку. В этих случаях приходится искусственно создавать поперечное изгибающее усилие, чтобы нарушить это состояние и продолжить торошение. Наиболее лёгкий путь – создать усилие сверху вниз. В природе такие изгибы ровного ледяного поля наблюдаются при продольных нагрузках перед непосредственно разрушением. Чтобы избежать искусственного вмешательства при моделировании, иногда в месте контакта “ледяных полей” помещался толстый блок со скосом.

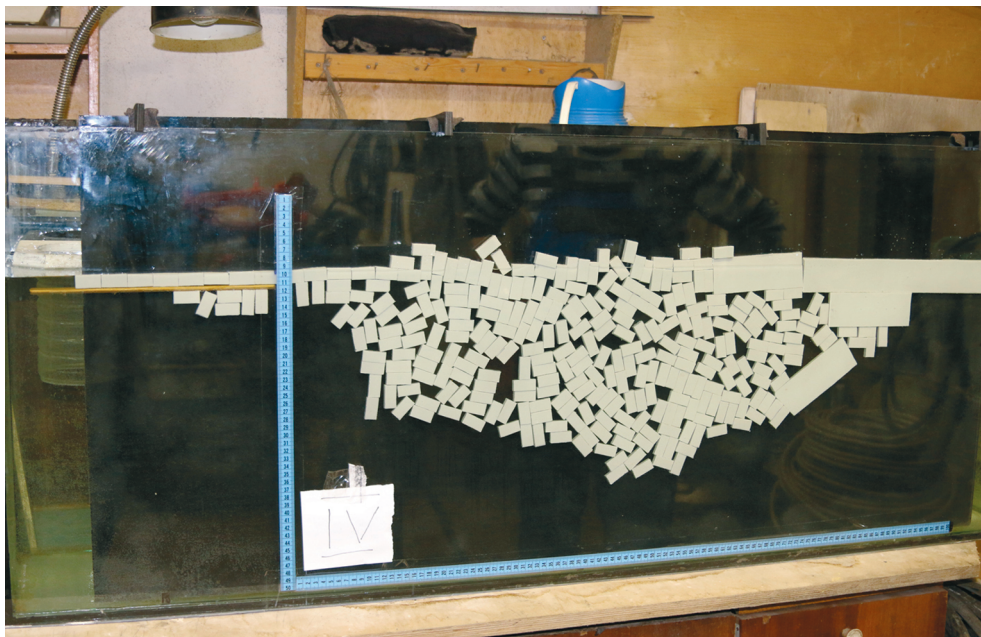


Рис. 1. Общий вид стенда для моделирования торошения
Fig. 1. General view of the bedstead simulator

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Процесс стендового моделирования торосов записывался на видео. После окончания эксперимента видеозапись разбивалась на отдельные кадры. Для каждого кадра яркость пикселей преобразовывалась в два цвета: черный и белый. Пороговое значение разделения яркости пикселей задавалось вручную для каждого видео отдельно. При такой конвертации цветов полученные черные и белые пиксели отображали воду и блоки-имитаторы льда соответственно. Каждому пикселю присваивались координаты – количество пикселей от левого и нижнего края кадра. В этих псевдокоординатах проходила векторизация растрового изображения: близлежащие пиксели белого цвета объединялись в один полигон, грани которого состояли из координат углов объединенных пикселей. После получения векторных полигонов происходила конвертация координат в расстояния, измеряемые в сантиметрах от левого края по горизонтали и от ватерлинии по вертикали. Для такой конвертации координат необходимо один раз для всего видео определить масштабный отрезок и положение ватерлинии. Ватерлиния и масштабный отрезок определялись вручную по одному выбранному кадру. При этом возможное искажение перспективы и наклон камеры автоматически корректировались.

Полученные полигоны отдельных блоков льда использовались для дальнейшего анализа. Толщина ровного льда определялась по первым

кадрам видео как толщина блоков, находящихся у левого и правого края кадра. На каждом последующем кадре последовательно искались точки, при которых толщина полигонов превышала толщину ровного льда. Эти координаты точек считались границами между ровным льдом и торосом (рис. 2). Полигоны блоков-имитаторов льда, которые находились внутри указанных границ, считались блоками тороса и выделялись в отдельную выборку для последующего анализа. Объединение разрозненных полигонов блоков торосов в один общий полигон с удалением дыр позволяет получить общий полигон тороса. При вычитании из полигона тороса полигонов блоков получался полигон пустот. Полигон пустот и полигоны блоков могут быть разделены на отдельные изолированные полигоны, для каждого из которых возможно было определить площадь, координаты барицентров (центров масс), координаты крайних точек и т.д. Зелёным цветом (см. рис. 2) показан максимальный по площади изолированный полигон полости.

Для полученных полигонов и для их надводных и подводных частей определялись координаты точек барицентров (центров масс), рассчитывались площадь и пористость надводной и подводной частей тороса. Для расчёта пористости полигоны блоков и пустот разделялись на отдельные соприкасающиеся прямоугольные полигоны заданной ширины (например, 1 см). Отношение площадей полигонов тороса и пустот внутри этих узких по-



Рис. 2. Обработанное изображение 1906-го кадра, приведённое в качестве примера. В результате обработки фиксируется двадцать морфометрических параметров внутреннего строения модельного тороса. Голубым цветом обозначен ровный лёд, бледно-розовым – блоки в торосе

Fig. 2. The processed image of the 1906th frame, given as an example. As a result of image processing, 20 morphometric parameters of the hummock structure are recorded. Blue colour shows the level ice; pale pink colour, blocks of ice within the body of an ice ridge

лигонов позволяет найти значение пористости с дискретностью, равной ширине узких полигонов. В зависимости от ориентации узких полигонов оценивалось распределение пористости по горизонтали или вертикали.

Полученные характеристики могут рассчитываться на каждый кадр видеосъёмки, но для оптимизации расчёта и для отслеживания непрерывной динамики параметров тороса на каждом новом кадре сопоставлялась площадь изменения положения блоков тороса. Если площадь изменений превышала заданное пороговое значение, то новый кадр видео использовался для анализа, а последовательные ряды измерений характеристик дополнялись новыми характеристиками.

В результате обработки изображения каждого кадра фиксируются 20 морфометрических параметров строения тороса, среди них: ширина паруса, ширина килля, координаты верхней точки паруса, координаты нижней точки килля, площадь паруса,

килля, блоков, распределение пористости по горизонтали и по вертикали, положение барицентра и пр. На основе этих параметров рассчитываются соотношение килля и паруса, углы ската и др.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Всего выполнено более сотни экспериментов по моделированию торосения. Во всех экспериментах моделировалось столкновение тонкого и толстого ледяных полей. Применялись две комбинации соотношения их толщины (1 : 4 и 1 : 2), а также соотношения длины и ширины пластин, имитирующих обломки льда (1×1, 2×1, 3×1). В нескольких экспериментах толстый лёд был заменён пластиной, имитирующей миделево сечение научно-экспедиционного судна “Северный полюс”.

Первоочередной интерес представляет сравнение модельных торосов с другими моделями и с профилями поперечного сечения реальных торосов. На рис. 3–5 приведены такие сравнения.

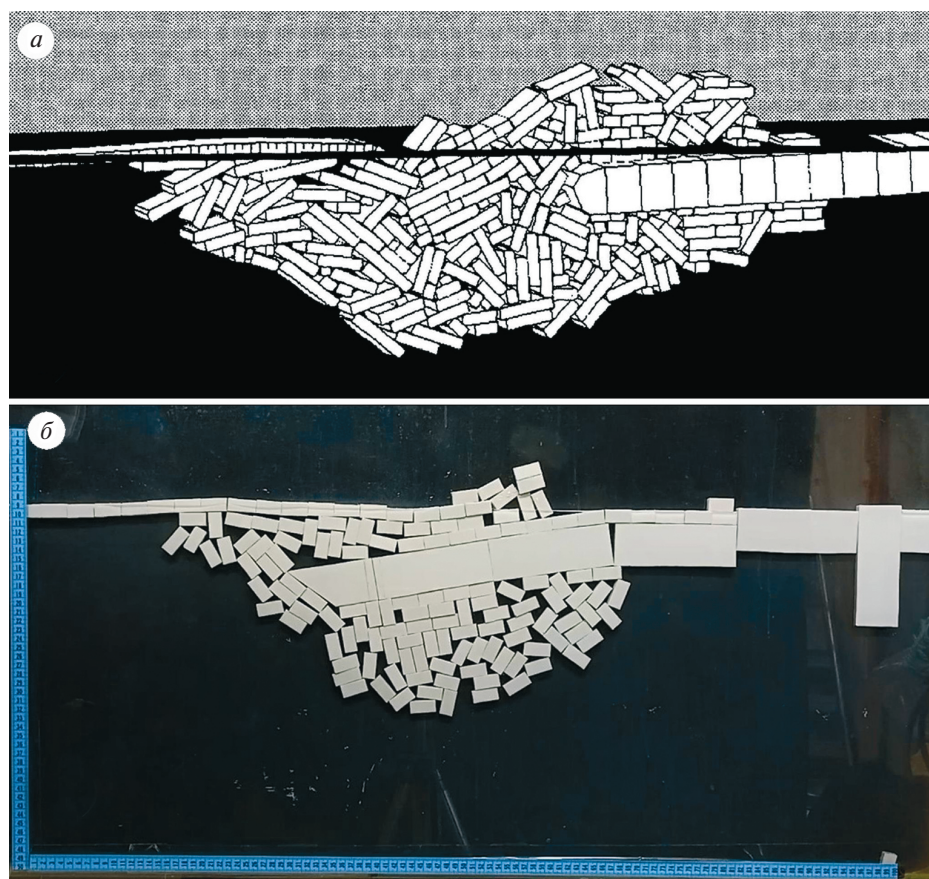


Рис. 3. Рисунок из статьи (Hopkins, 1998), иллюстрирующий картину, когда 150 м ледяного поля толщиной 500 мм нагромождено в виде тороса на двухметровый толстый лёд (а); похожая конфигурация блоков-имитаторов (б)
Fig. 3. Snapshot from a ridging simulation at a point when a 150 m extent of 500 mm thick lead ice has been pushed into a 2 m thick floe (Hopkins, 1998) (а); a similar configuration of ice simulator blocks (б)

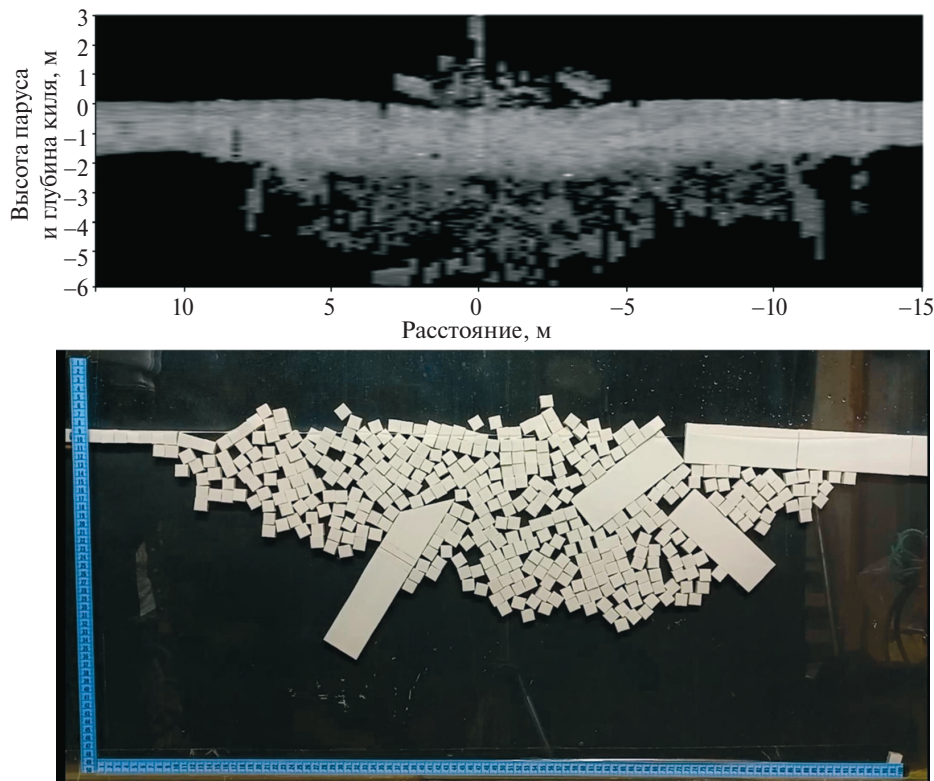


Рис. 4. Профиль тороса, исследованного в 2016 г. в проливе Шокальского (а), и похожая конфигурация блоков-имитаторов (б)
Fig. 4. Ice ridge profile studied investigated in 2016 in the Shokalsky Strait (Severnaya Zemlya Archipelago) (a); a similar configuration of ice simulator blocks (b)

Казалось маловероятным, что внутри тороса могут быть горизонтальные протяжённые полости. Однако результаты экспериментов, показанные на рис. 6, опровергают это утверждение. В центральной части килля можно наблюдать протяжённые субгоризонтальные полости.

Увеличение осадки модельного тороса по мере нарастания общей площади блоков, задействованных в эксперименте, для трёх типоразмеров блоков практически одинаково. Зависимости одинаково хорошо аппроксимируются как логарифмом, так и степенной функцией (рис. 7). Для логарифмической функции коэффициент детерминации $R^2 = 0.87-0.90$, для степенной функции $R^2 = 0.90-0.91$. Логарифмическая аппроксимация больше подходит для левой части облака точек, а степенная — для правой. Удлиненность блоков очень слабо влияет на величину осадки килля. С увеличением этого параметра наблюдается незначительное увеличение осадки килля (см. рис. 7). Практически, эти зависимости можно описать простой формулой:

$$K = 0.8\sqrt{S_b},$$

где K — осадка килля, см, S_b — общая площадь блоков, см². По этой формуле можно рассчитать и оценить возможную осадку килля. Например, в результате взаимодействия ледяного поля толщиной 0.4 м и длиной 800 м (площадь поперечного сечения составит $800 \times 0.4 = 320 \text{ м}^2$) с толстым льдом осадка килля достигнет 14 м.

Согласно полученной зависимости в виде квадратного корня, на первом этапе (задействовано 25% мелких блоков) осадка килля достигает 52–61% от максимального значения, на втором (задействовано 50% мелких блоков) — 75–78%. То есть основная осадка килля формируется на I и II этапах. Изначально киль тороса интенсивно растёт вниз, а затем начинают заполняться боковые части килля. Формирование паруса также происходит на первых двух этапах.

Ширина тороса также не зависит от соотношения длина/ширина блока, а изменяется пропорционально суммарной площади блоков. Согласно 62 экспериментам, среднее отношение ширина/осадка килля w_k/H_k равняется 3.09, СКО = 0.44.

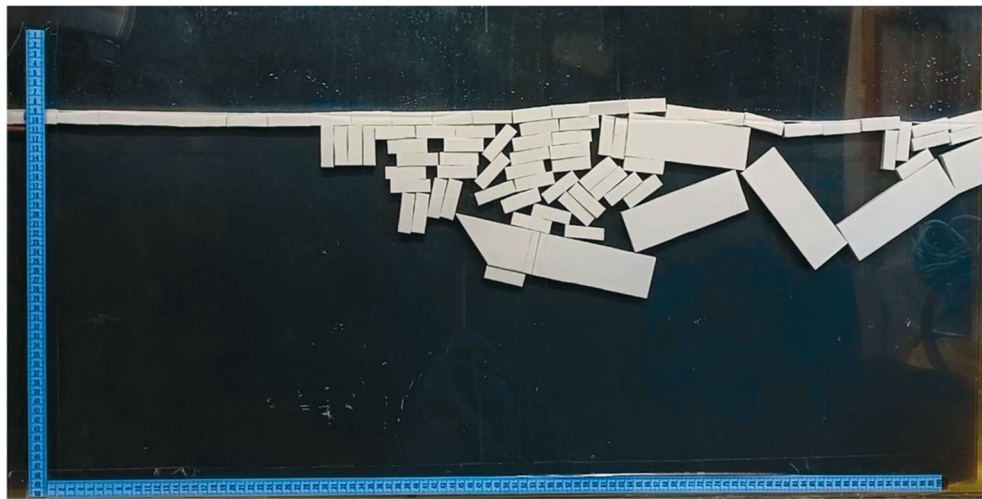
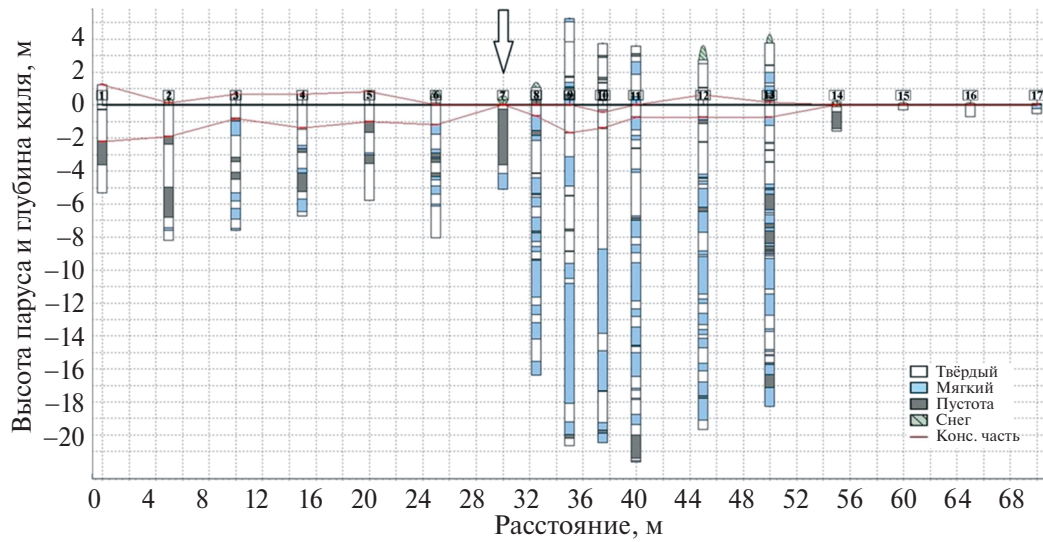


Рис. 5. Профиль тороса, на котором в центре в точке 7 (обозначена стрелкой) наблюдается провал с вертикальным размером около 3.5 м (а), и конфигурация блоков-имитаторов с крупной полостью (б)
Fig. 5. The profile of the hummock, on which a void with a vertical size of about 3.5 m is observed in the center at point 7 (highlighted by an arrow) (a), and configuration of ice simulator blocks with a large cavity (b)



Рис. 6. Модельный профиль тороса, показывающий наличие протяжённых субгоризонтальных полостей в центральной части киля
Fig. 6. A model profile of a hummock showing the presence of extended horizontal cavities in the central part of the keel

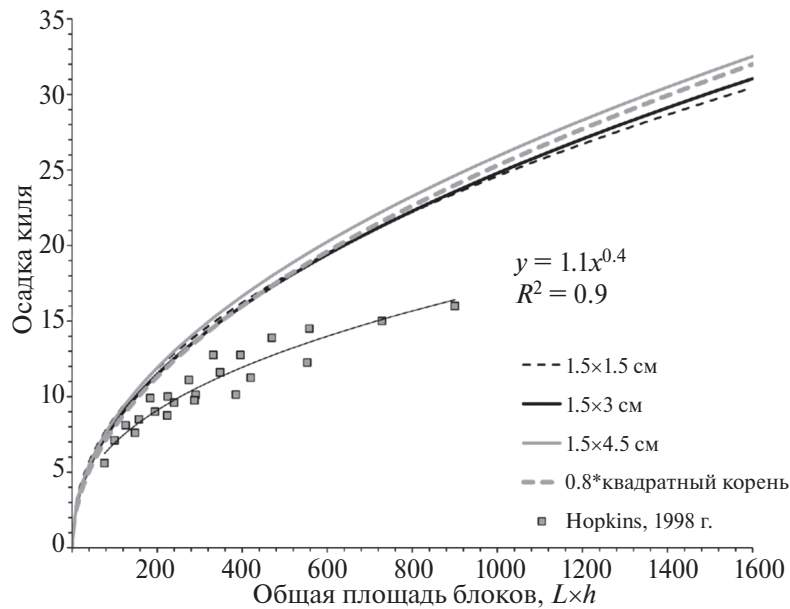


Рис. 7. Степенная аппроксимация осадки киля для трёх типоразмеров блоков-имитаторов и расчётные значения осадки киля из работы (Hopkins, 1998). L – протяжённость ледяного поля, м; h – толщина льда, м (там же). Пунктирной линией показана обобщённая квадратичная зависимость $y = 0.8\sqrt{x}$

Fig. 7. A power approximation of the keel draft for three standard sizes of ice simulator blocks and calculated values of the keel draft from (Hopkins, 1998). L is the ice extent, m; h , lead ice thickness, m (ibid). Dotted line shows the generalized squared relationship $y = 0.8\sqrt{x}$

Интересно, что в одном из экспериментов “отколовшийся” блок толстого льда за весь период торошения повернулся вокруг своей оси пять с половиной раз.

СЦЕНАРИИ ТОРОШЕНИЯ

В статье под сценарием понимается качественное описание процесса, при котором происходит последовательное развитие торошения во времени от начала до завершения, при этом идентифицированы ключевые события, которые характеризуют конкретный процесс и отличают его от других.

В ряде экспериментов одновременно применялись блоки двух типоразмеров, причём суммарные площади блоков и одного и другого размера были одинаковы. Сначала шли блоки одного размера, затем второго. Появилась возможность проследить, как блоки внедряются в уже сформированный киль. На рис. 8 показаны результаты одного из экспериментов. В данном случае на первом этапе блоки тонкого льда размером 3×1.5 см сформировали торос на краю толстого льда. Затем продолжилось торошение тонкого льда, но уже с размерами блоков 1.5×1.5 см. В финале получилась представленная

конфигурация блоков. Для лучшего восприятия более удлинённые блоки раскрашены синим цветом (за исключением части блоков, отделённых от общей массы толстыми блоками).

При сжатии надвигающийся тонкий лёд либо уходит вверх, образуя наслоение и впоследствии разрушаясь, либо, подобно струе, внедряется в киль. В обоих случаях “новые” блоки, нагромождаясь, под собственным весом смещаются вниз. Синие блоки оказываются вытесненными к нижней поверхности киля, и оказавшиеся на краю киля блоки начинают скатываться с киля влево, увлекая за собой белые блоки. Видно (см. рис. 8), что зоны белого льда в нижней части смещены влево. Этот процесс подобен завихрениям.

В последующих экспериментах одновременно применялись блоки одного размера, но двух цветов, причём суммарные площади блоков и одного и другого цвета были одинаковы. Сначала шли блоки одного цвета, затем второго. В этом случае можно проследить, как блоки уже одного типоразмера внедряются в сформированный неконсолидированный киль. Мгновенные снимки процесса завихрения представлены на рис. 9. В данном эксперименте применялись блоки с соотношением сторон 4.5×1.5 см.



Рис. 8. Зоны внедрения блоков с размером 1.5×1.5 см в торос, сформированный блоками 3×1.5 см на краю толстого льда
Fig. 8. Zones of embedding blocks with a size of 1.5×1.5 cm into a hummock formed by blocks of 3×1.5 cm on the edge of thick ice

Голубые блоки наслаиваются на сформированный киль и на некотором участке начинают группироваться, опускаться и образовывать зону “нового” льда. Затем развитие этой зоны прекращается, и начинает формироваться новая зона. А старая зона постепенно погружается в киль тороса. Процесс завихрения начинает формироваться в новом месте.

Однако в некоторых случаях, происходящих довольно редко (примерно в 20% экспериментов), накопление новых блоков происходит на краю сформировавшегося кия, наслаения и последующих завихрений не происходит. Пример такого сценария торшения показан на рис. 10. На данный момент нет ясности в причинах торшения по этому сценарию, который можно назвать сценарием “примыкания”, требуется продолжение экспериментов.

Эксперименты также показывают, что возможна смена сценариев непосредственно во время торшения, когда сценарий завихрения постепенно сменяется сценарием “примыкания”. Замечено, что понятие сценария торшения довольно условно. Эксперименты на стенде показали, что нет торшения, которое соответствовало бы сценарию в чистом виде. Каждое торшение индивидуально, и отнести его к тому или иному сценарию можно только условно. Также пока не удалось выявить причин, почему торшение идёт по тому или иному сценарию. Не выявлено также явных различий в процессе торшения с использованием блоков с различным соотношением сторон. Возможно, на модельное торшение оказывает влияние тот факт, что блоки имитируют уже взломанный лёд.

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поскольку модель — это упрощённое представление реального объекта, поэтому сравнение результатов моделирования объекта или процесса, выполненных разными способами, является вполне обоснованным. Физическое моделирование и компьютерное моделирование различны по своей сути, но моделируют один и тот же процесс. М. Хопкинс в своей модели применил скошенный край тонкого поля для облегчения торшения тонкой льдины на толстое ледяное поле (Hopkins 1998). В наших экспериментах все блоки имеют перпендикулярную форму. Крайний левый блок толстого льда имеет небольшой скос. Этот блок можно рассмотреть (см. рис. 8) (нижний толстый блок). В некоторых экспериментах применялся блок с 45-градусным скосом для того, чтобы сравнить ход торшения со случаями, когда использовался прямоугольный край блока. Очевидно, что 45-градусный скос — это явно искусственный случай. Как уже говорилось, в случаях, когда блоки выстраиваются в линию и упираются в стенку, приходится создавать искусственное давление, направленное вертикально вниз, чтобы нарушить прямоугольную горизонтальную линию блоков, и процесс торшения продолжался. К сожалению, усилие направлено всегда сверху вниз, как наиболее лёгкий путь решить эту проблему. К тому же место приложения усилия выбиралось произвольно. Влияние таких манипуляций на ход торшения специально не исследовалось.

Сравнение модельных торосов с другими моделями и с профилями поперечного сечения реальных торосов показало неплохое совпадение.

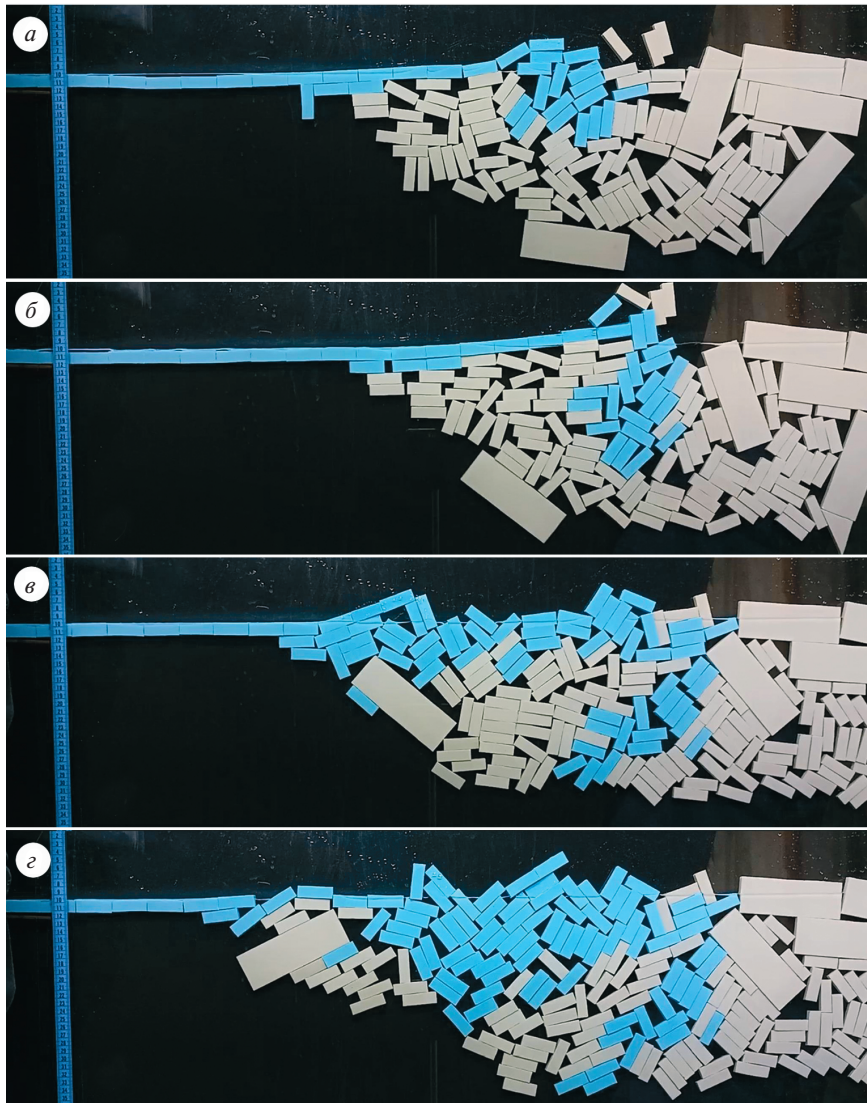


Рис. 9. Мгновенные снимки процесса завихрения при формировании тороса
Fig. 9. Snapshots of eddying during the hummock formation



Рис. 10. Формирование кия согласно второму сценарию, когда наслонения и последующих завихрений не происходит, а новые блоки концентрируются у края кия тороса
Fig. 10. Formation of the ice ridge keel according to the second scenario when the rafting and following eddying do not happen but new ice blocks are accumulated at the edge of hummock keel

Например, (см. рис. 3) в модельном торосе можно наблюдать все признаки расчётного тороса Хопкинса (Hopkins, 1998). Это и рафтинг тонкого льда, и “Ramp Up” (термин, который можно перевести как сооружение трапа) на парус, и прогиб вниз толстого льда, и вздыбливание тонкого льда под давлением блоков килья, некомпенсированным сверху. Даже линия левого склона килья не совсем прямолинейная, так же как и у расчётного тороса. Торосы (см. рис. 5) абсолютно разные, но схожи тем, что у обоих торосов в центральной части килья есть крупная полость. То есть модельный торос подтверждает возможность существования такого феномена.

М. Хопкинс приводит расчётные значения осадки килья моделированного тороса по мере “расходования на торошение” тонкого ледяного поля для различной толщины льда (Hopkins 1998). Эти значения показаны на рис. 7, где по оси абсцисс отложено произведение длины ледяного поля на его толщину, т.е. площадь поперечного сечения. Сравнение с результатами нашего моделирования проводилось по трём взаимосвязанным критериям: форма облака точек и их разброс, вид наиболее подходящей аппроксимирующей кривой, степень различия параметров этой кривой. Анализ выявил, что форма облака точек (на рис. 7 не показаны) осадки килья нашего модельного тороса по мере нарастания общей площади блоков, задействованных в эксперименте, и расчётного тороса М. Хопкинса сходны, хотя у него разброс точек меньше, возможно, из-за значительной разницы в общем количестве точек. Обе зависимости хорошо аппроксимируются степенной функцией. Однако показатель степени (0.39) отличается от 0.5, соответствующего квадратному корню. По-видимому, это связано с тем, что в модели М. Хопкинса осадка килья достигает максимального значения и при дальнейшем торошении не увеличивается.

Зависимость осадки килья в виде корня квадратного из площади килья вытекает из геометрических соображений. Площадь треугольника, каким обычно изображают киль тороса, пропорциональна квадрату высоты, т.е. осадки килья. Коэффициент пропорциональности зависит от угла склона килья. В нашем случае площадь килья пропорциональна площади блоков, задействованных в эксперименте, считая пористость килья постоянной в первом приближении. Анализ распределения пористости модельного тороса будут посвящены дальнейшие исследования.

В природе разрушение неконсолидированного килья торосов может происходить по разным механизмам из-за сложной внутренней структуры. Основными способами разрушения являются сдвиг и уплотнение. В работе (Patil et al., 2012) определены по крайней мере три различных физических механизма, которые могут иметь место при деформировании неконсолидированного килья: разрушение ледяных перемычек между ледяными блоками; вращение и перестановка блоков; разрушение ледяных блоков.

Goldstein et al. (2013) выполнили 2D-моделирование механизмов и сценариев нагромождения льда на наклонную стенку. Их результаты показали, что наиболее вероятный сценарий — это изгибное смещение ледяной пластины перед уже сформировавшимся нагромождением или толстым ледяным полем, сопровождаемое в некоторых случаях эмиссией большого количества ледяных блоков в тело паруса в форме струй. Подобная картина наблюдалась и в наших опытах. Отличие было в том, что струи распространялись в верхнюю часть килья. И нагромождение блоков сверху, и струи внутрь килья приводили к тому, что новая порция блоков под действием силы тяжести смещалась вниз, а затем влево, к краю килья. В результате получалось как бы закручивающие движения блоков в виде вихря.

Этапы формирования модельных торосов в целом соответствуют схеме формирования тороса на краю поля толстого льда, предложенной О. Коваксом и С. Соди (Kovaks and Sodhi, 1979). Тем не менее, нельзя не заметить некоторые отличия. Так, парус модельных торосов не так явно выражен, как в предложенной схеме. Хотя схема Ковакса и Соди подтверждается натурными измерениями. В работе (Kharitonov, 2013) соотношение толщин тонкого и толстого льда составило 1 : 12.5, в то время как в схеме Ковакса и Соди оно составило по визуальной оценке 1 : 5–6 (1979). В наших модельных торосах соотношение толщин 1 : 4. У М. Хопкинса соотношение толщин варьирует от 1 : 2.5 до 1 : 5, и так же в его торосах формируется выраженный парус (1998). Предположено, что при большой разности толщин льда, участвующего в торошении, в первую очередь активно будет формироваться парус тороса.

В схеме, предложенной О. Коваксом и С. Соди (1979), акцентировано внимание на наложение сверху пластины тонкого льда и на внедрение внутрь груды обломков льда, образующей парус. В смоделированных торосах происходит формиро-

вание преимущественно кия из обломков тонкого льда. Возможно, на такой характер формирования тороса влияет тот факт, что блоки-имитаторы представляют уже разломанную пластину.

Нагрузка, создаваемая экспериментатором на горизонтальную стопку блоков во время эксперимента, была достаточна для движения блоков и нагромождения их на моделированный торос. Оценка этой нагрузки не проводилась. Авторы, не являясь специалистами в области ледовых нагрузок, проблему пропорциональности (в рамках подобия) нагрузки силам, действующим на торосащийся лёд в природе, также не рассматривали.

Очевидным выигрышным решением имитатора льда было бы, если бы выбранный материал мог разламываться под действием нагрузок. В этом случае торцы блоков имели бы естественную случайную форму, а не прямоугольную, как в нашем эксперименте. Но тогда пришлось бы делать блоки с квадратным сечением и существенно ограничить перемещение блоков в поперечном направлении, чтобы разломы происходили только в вертикальной плоскости. Это приведёт к изменению всей конфигурации стенда. Также необходимо подобрать материал с плотностью, близкой к плотности льда, который мог бы достаточно легко ломаться, иначе придётся прикладывать большое усилие для перемещения блоков. На данном этапе не стояло такой задачи.

Дробление блоков и уплотнение кия под действием силы Архимеда, происходящее во время торошения, в наших экспериментах не моделируется, поэтому осадка кия значительна, и отношение ширина/осадка кия существенно меньше, чем приводится в тематических обзорах: $w_k = 3.91H_k$, $n = 65$ (Timco, Burden, 1997), $w_k/H_k = 4.85$, стандартное отклонение 2.65, $n = 149$ (Strub-Klein, Sudom, 2012).

Моделирование торошения на стенде даёт сценарий преимущественно для тонкого льда при взаимодействии с толстым льдом. Однако при сжатии толстых льдов картина несколько другая. Как показывают наблюдения, торошение толстого льда сопровождается крошением льда, расслоением и происходит нагромождение преимущественно бесформенных обломков льда. Эти обломки льда обычно имеют характерный размер в два-три раза меньше толщины исходного льда. Исследование механизма торошения, сопровождаемого крошением льда, является задачей будущего.

ВЫВОДЫ

Моделирование — это метод исследования объектов через их упрощенные представления. Если в результате эксперимента получен ожидаемый результат, можно считать эксперимент полноценным (при принятой степени упрощения). Выполненное моделирование торошения на стенде даёт возможность лучше понять процессы формирования торосов.

Полученные модельные профили поперечного сечения были сравнены с профилями поперечного сечения реальных торосов, полученными с помощью термобурения. Результаты вполне удовлетворительны, что говорит о том, что моделирование адекватно отражает формирование реальных торосов. Увеличение осадки модельного тороса пропорционально корню квадратному из общей площади блоков, задействованных в эксперименте, с коэффициентом 0.8. На начальном этапе торошения киль тороса интенсивно растёт вниз, а затем начинают заполняться боковые части кия. Внедрение блоков в формирующийся торос происходит как сверху в виде наслоения, так и внутрь кия в виде струй. В дальнейшем блоки под действием силы тяжести смещаются вниз, образуя некоторое подобие завихрения, тем самым определяя преимущественный сценарий торошения.

Согласно второму сценарию, который можно назвать сценарием “примыкания”, накопление новых блоков происходит на краю сформировавшегося кия, наслоения и последующих завихрений не происходит. Торошение по второму сценарию случается гораздо реже, примерно в 20% экспериментов. На данный момент нет ясности в причинах торошения по тому или другому сценарию. Моделирование на стенде в представленном виде отражает преимущественно торошение тонких льдов, так как торошение толстых льдов обычно сопровождается разрушением и расслоением торосающегося льда. Стенд может быть рекомендован для моделирования поведения ледяной каши в ледяных каналах и акваториях, заполненных тертым льдом.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 25-27-00389.

Acknowledgments. This study was supported by the Russian Science Foundation, project No. 25-27-00389.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Ю.Н., Афанасьев В.П., Литонов О.Е., Мансуров М.Н., Панов В.В., Трусков П.А.* Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа / Под ред. О.Е. Литонова и В.В. Панова. СПб.: Гидрометеоздат, 2001. 360 с.
- Афанасьев В.П.* Ледовые нагрузки на вертикальные опоры морских платформ. Автореферат дисс. на соискание учёной степени канд. технич. наук. М.: Московский инженерно-строительный институт им. В.В. Куйбышева, 1971. 98 с.
- Бужин В.А.* Зажоры и заторы льда на реках России. СПб: Госуд. гидрологич. институт, 2016. 240 с.
- Вершинин С.А., Черушев А.Г., Копайгородский Е.М.* Способ формирования искусственных торосов. Патент на изобретение № 763508. Приоритет изобретения 15.03.1979.
- Тышко К.П.* Формирование и консолидация торосов в однолетнем ледяном покрове арктических морей как результат лабораторных и натурных исследований // Метеорология и гидрология. 2009. № 8. С. 71–79.
- Goldstein R., Onishchenko D., Osipenko N., Shushpannikov P., Naumov M.* Grounded ice pile-up. 2D DEM simulation // Proc. of the 22nd Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). June 9–13, 2013. Espoo, Finland.
- Guzenko R.B., Mironov Ye.U., May R.I., Porubaev V.S., Kornishin K.A., Efimov Ya.O.* Morphometry of first-year ice ridges with greatest thickness of the consolidated layer and other statistical patterns // Intern. Journ. of Offshore and Polar Engineering. 2022. V. 32. № 2. P. 160–167.
- Hopkins M.A.* On the ridging of intact lead ice // Journal of Geophys. Research. 1994. V. 99. № C8. P. 16351–16360.
- Hopkins M.A.* Four stages of pressure ridging // Journ. of Geophys. Research. 1998. V. 103. № C10. P. 21883–21891.
- Kharitonov V.V.* On the results of research of the internal structure of ice ridges in the “North Pole – 2010” expedition at Barneo ice camp in April 2010 // Proc. of the 22nd Intern. Confer. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). June 9–13, 2013. Espoo, Finland.
- Kovaks A., Sodhi S.D.* Ice pile-up and ride-up on Arctic and subarctic beaches // Proc. of POAC’79. 1979. V. 1. P. 127–146.
- Parmeter R.R., Coon M.D.* Model of pressure ridge formation in sea ice // Journ. of Geophys. Research. 1972. V. 77. № 33. P. 6565–6575.
- Patil A., Sand B., Fransson L., Daiyan H.* Constitutive Models for Sea Ice Rubble in First Year Ridges: a Literature Review // Proc. of the 21st IAHR Intern. Symposium on Ice “Ice Research for a Sustainable Environment”. Li and Lu (ed.). Dalian, China. June 11 to 15, 2012. Dalian University of Technology Press. Dalian.
- Strub-Klein L., Sudom D.* A comprehensive analysis of the morphology of first-year sea ice ridges // Cold Region Science and Technology. 2012. V. 82. P. 94–109.
- Timco G.W., Burden R.P.* An analysis of the shape of sea ice ridges // Cold Region Science and Technology. 1997. № 25. P. 65–77.
- AARI// Электронный ресурс. URL: <https://www.aari.ru> (Дата обращения: 21.10.2025).
- Krylov-Centre // Электронный ресурс. URL: <https://krylov-centre.ru> (Дата обращения: 21.10.2025).

Citation: Kharitonov V.V., May R.I., Borodkin V.A. Physical Modelling of Hummock Formation. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2026, 66 (2): 365–378. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526020107

Physical Modeling of Hummock Formation

© 2026 V. V. Kharitonov^{a,*}, R. I. May^{a,b}, V. A. Borodkin^a

^aArctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

^bSaint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg, Russia.

*e-mail: kharitonov@aari.ru

Received October 21, 2025; revised December 3, 2025; accepted March 23, 2026

The process of ice hummock formation under pressure was simulated using a two-dimensional stand. The purpose of the work was to observe the movement of polypropylene plates, which simulate ice blocks, relative to each other during the simulation of an ice hummock formation. The main idea of the stand is to limit the movement of the ice simulating blocks only in the vertical plane. This plane creates the illusion of a cross-section of a hummock. The design of the stand and the modeling methodology are discussed. The process of physical modeling was recorded on video. Using computer vision technology, each frame was analyzed

based on operations with vector polygons. As a result of image processing, 20 morphometric parameters of the hummock structure were recorded, including: sail width, keel width, coordinates of the upper point of the sail, coordinates of the lower point of the keel, sail, keel, area of blocks, distribution of porosity horizontally and vertically, position of barycenters, etc. Keel draft of the model intensifies as the total area of the blocks involved into the experiment increases. The increase in the model is proportional to the square root of the total area of the blocks with a coefficient of 0.8. The obtained model cross-section profiles were compared with the real cross-sections of the ice hummocks. The results are quite satisfactory, indicating that the modeling adequately reflects the formation of real ice hummocks. In a number of experiments, blocks of two colors were used consistently, and the total areas of blocks of both colors were the same. When compressed, the impending thin ice goes up, rafting and subsequently collapsing. The introduction of blocks into the forming hummock occurs both from above in the form of a layering, and inside the keel in the form of “jets”. Further, the blocks under the influence of gravity move downwards, forming a kind of whirlwind, thereby determining the predominant scenario of hummocking. According to the second scenario, which can be called the “adjoining” scenario, the accumulation of new blocks occurs at the edge of the formed keel, and no layering or subsequent swirls take place. The second scenario of hummocking occurs much less frequently, in approximately 20% of the experiments. At the moment, the reasons for hummocking in either scenario remain unclear.

Keywords: ridging, bedstead simulator, model hummock, video image, keel draft, morphometric parameter, scenario

REFERENCES

- Alekseyev Y., Afanas'ev V.P., Litonov O.E., Mansurov M.N., Panov V.V., Truskov P.A. Ledotekhnicheskie aspekty osvoeniia morskikh mestorozhdenii nefiti i gaza. Ice Engineering Aspects of Development of Marine Oil and Gas Fields. Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 2001: 360 p. [In Russian].*
- Afanas'ev V.P. Ledovye nagruzki na vertikal'nye opory morskikh platform. Ice loads on the vertical bearings of offshore structures PhD-thesis. Moscow: Moscow Engineering-builds. V. V. Kuibyshev Institute, 1971: 98 p. [In Russian].*
- Buzin V.A. Zazhory i zatory l'da na rekah Rossii. Ice jams and hanging dams on the rivers of Russia. Saint Petersburg: State Hydrological Institute, 2016: 240 p. [In Russian].*
- Vershini S.A., Cherushev A.G., Kopaygorodsky E.M. Sposob formirovaniya iskusstvennykh torosov. Method of formation of artificial ice ridges. Patent for invention No. 763508. Priority of the invention is 15.03.1979. [In Russian].*
- Tyshko K.P. Formation and consolidation of hummocks on the Arctic seas (laboratory experiments and natural investigations). Meteorologiya i gidrologiya. Russian Meteorology and Hydrology. 2009, 8: 71–79. [In Russian].*
- Goldstein R., Onishchenko D., Osipenko N., Shushpannikov P., Naumov M. Grounded ice pile-up. 2D DEM simulation. Proc. of the 22nd Int. Conf. On Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). June 9–13, 2013. Espoo, Finland.*
- Guzenko R.B., Mironov Ye.U., May R.I., Porubaev V.S., Kornishin K.A., Efimov Ya.O. Morphometry of First-Year Ice Ridges with Greatest Thickness of the Consolidated Layer and Other Statistical Patterns. Intern. Journ. of Offshore and Polar Engineering. 2022, 32 (2): 160–167.*
- Hopkins M.A. On the ridging of intact lead ice. Journ. of Geophys. Research. 1994, 99 (C8): 16351–16360.*
- Hopkins M.A. Four stages of pressure ridging. Journ. of Geophys. Research. 1998, 103 (C10): 21883–21891.*
- Kharitonov V.V. On the results of research of the internal structure of ice ridges in the “North Pole-2010” expedition at Barneo ice camp in April 2010. Proc. of the 22nd Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). June 9–13, 2013 Espoo, Finland.*
- Kovaks A., Sodhi S.D. Ice pile-up and ride-up on Arctic and subarctic beaches. Proc. of POA'79. 1979, 1: 127–146.*
- Parmarter R.R., Coon M.D. Model of pressure ridge formation in sea ice. Journ. of Geophys. Research. 1972, 77 (33): 6565–6575.*
- Patil A., Sand B., Fransson L., Daiyan H. Constitutive Models for Sea Ice Rubble in First Year Ridges: a Literature Review. Proc. of the 21st IAHR Int. Symp. on Ice “Ice Research for a Sustainable Environment”, Li and Lu (ed.), Dalian, China, June 11 to 15, 2012. Dalian University of Technology Press, Dalian.*
- Strub-Klein L., Sodom D. A comprehensive analysis of the morphology of first-year sea ice ridges. Cold Regions Science and Technology. 2012, 82: 94–109.*
- Timco G.W., Burden R.P. An analysis of the shape of sea ice ridges. Cold Regions Science and Technology. 1997, 25: 65–77.*
- AARI: official site. Retrieved from: URL: <https://www.aari.ru> (Last access: October 21, 2025).
- Krylov-Centre: official site. Retrieved from: URL: <https://krylov-centre.ru> (Last access: October 21, 2025).