

## О ВОЗДЕЙСТВИИ ЛЬДА НА КАМЕННУЮ НАБРОСКУ ПОРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

А. А. Добродеев, К. Е. Сазонов

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2022 г.

*Представлены экспериментальные результаты выполненных в ледовом бассейне Крыловского научного центра исследований по изучению особенностей взаимодействия со льдом каменной наброски, которая часто используется в портовых защитных сооружениях (дамбы, молы и пр.). Основное внимание уделялось изучению вопросов влияния каменной наброски на уровень глобальной ледовой нагрузки, на процесс образования ледяного нагромождения перед сооружением, а также разрушению наброски под действием льда. Эксперименты показали, что горизонтальная составляющая глобальной ледовой нагрузки изменяется мало, а вертикальная составляющая заметно уменьшается. Выяснено, что каменная наброска смещает ледяное образование в сторону моря и тем способствует защите рабочих поверхностей сооружения от попадания льда. Показано, что наброска может разрушаться наползающим на сооружение ледяным покровом. Выявлены два возможных сценария этого разрушения. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения каменной наброски в условиях Арктики.*

**Ключевые слова:** ледовая нагрузка, ледяное нагромождение, ледовый бассейн, разрушение, трение.

### Введение

В настоящее время происходит активное промышленное освоение полярных областей России. Хорошо известно, что морской и речной транспорт перевозят основную массу грузов в этом регионе. Дальнейшее развитие морских и речных перевозок зависит от создания системы портов, приспособленных для эффективной работы в суровых условиях Арктики. Проводящиеся сейчас работы по проектированию новых портов приводят к постановке новых задач морской ледотехники [1]. Одной из таких задач является изучение характера взаимодействия со льдом каменной наброски защитных и других сооружений портов.

Каменная наброска часто применяется для укрепления откосов различных гидротехнических сооружений, а также берегов различных водоемов [2]. Основное назначение каменной отсыпки — защитить сооружение или берег от разрушительного воздействия волн. В России опубликован ряд работ, посвященных проектированию сооружений с каменной наброской [3; 4], а также соответствующие нор-

мативные документы [5—7]. Наибольшее внимание исследователи уделяли изучению проблемы устойчивости каменной наброски к действию волнения, так как именно волнение обычно является основной причиной ее разрушения. В этом направлении были разработаны как теоретические расчетные методы [8], так и широко применяемое моделирование процессов в специализированных бассейнах [9; 10].

Ледовые воздействия на каменную наброску изучены значительно меньше. Так, отсутствуют оценки влияния каменной наброски на величину воспринимаемых сооружением ледовых нагрузок. Не совсем понятна роль такой наброски в формировании надводных нагромождений льда перед гидротехническим сооружением, которые оказывают существенное влияние как на величину глобальной ледовой нагрузки, так и на возможность безопасной эксплуатации сооружения [11]. Не исключается возможность разрушения каменной наброски при взаимодействии со льдом. В [12] отмечается, что такая наброска успешно противостоит воздействию ровных ледяных полей, хотя и может разрушаться при взаимодействии с ними. В настоящее время отсутствуют общепринятые методы исследования



Рис. 1. Модель гидротехнического сооружения для испытаний с ячейками для размещения щебня (а) и с установленным имитатором каменной наброски (б). Фотография сделана при подготовке модельных испытаний в ледовом бассейне Крыловского центра

Fig. 1. Model of hydraulic structure for testing with sells for placing crushed stone (a) and installed rockfill simulator (b). The photo was taken during the preparation of model tests in the ice tank of the Krylov Center

воздействия льда на каменную наброску. В данной работе предпринята попытка рассмотреть процесс взаимодействия каменной наброски со льдом путем проведения модельных исследований, выполненных в ледовом бассейне Крыловского государственного научного центра [13].

### Объекты экспериментального исследования в ледовом бассейне

Исследования взаимодействия гидротехнических сооружений с каменной наброской начались в ледовом бассейне Крыловского центра относительно недавно. Первые результаты были опубликованы в [14]. В этой работе описан один из первых экспериментов, который убедительно показал, что имитация каменной засыпки на модели гидротехнического сооружения заметно изменяет характер разрушения ледяного покрова, а также процесс формирования надводного нагромождения льда.

Как описано в указанной статье, эксперимент проводился в режиме прямого движения (моделированный ледяной покров приводился в движение и взаимодействовал с неподвижной моделью). Особенность выполнения экспериментов в режиме прямого движения состоит в том, что при такой схеме опыта очень сложно организовать измерение глобальной ледовой нагрузки на модель. Кроме того, практически отсутствует возможность изменения ориентации модели относительно направления движения льда. Поэтому основным режимом испытания моделей инженерных сооружений является режим обращенного движения (поле моделированного льда неподвижно, а модель протаскивается сквозь него) [13]. Такой способ испытаний лишен указанных недостатков. Поэтому для более детального изучения влияния имитации каменной наброски подавляющая часть последующих экспериментов проводилась при обращенном движении.

Имитация каменной наброски осуществляется с использованием гравия, размер и масса которо-

го соответствуют натурным камням с учетом выбранного масштаба моделирования. При этом используются два подхода к имитации наброски. При исследованиях в прямом движении весь профиль сооружения набирается из камня и удерживается в таком положении под действием собственного веса и сцепления между отдельными камнями (рис. 1).

При испытаниях в обращенном движении для уменьшения массы модели, необходимого для повышения собственной частоты колебаний измерительной установки (модель и динамометр), а также для удобства выполнения экспериментов при изменении ориентации модели относительно направления движения часто используется однослойное размещение щебня на наклонной поверхности (рис. 2). При этом поверхность модели имеет специальное покрытие, состоящее из приклеенного к ней щебня заданной фракции, позволяющее воспроизвести условия взаимодействия льда с поверхностью натурной дамбы, с ее каменной наброской. Эксперименты в обращенном движении могут также проводиться и при многослойной наброске щебня.

Для изучения возможности разрушения льдом каменной наброски были проведены эксперименты по схеме прямого движения. Использовалась модель, весь профиль которой набирался из щебня. Для удобства наблюдения за процессом разрушения наброски камни, расположенные на уровне точки приложения ледовой нагрузки, были окрашены в красный цвет, следующий ряд — в зеленый, а камни, формирующие гребень моделируемой дамбы, — в желтый (рис. 3).

Основной целью исследований являлось изучение влияния имитации каменной наброски не на уровень воспринимаемой моделью глобальной ледовой нагрузки, а на размеры и характер надводного ледяного нагромождения. Кроме того, исследовались условия, при которых возможно разрушение наброски льдом.

### Результаты экспериментальных исследований

Влияние каменной наброски при взаимодействии сооружения со льдом может проявляться в изменении уровня глобальной ледовой нагрузки, а также в особенностях формирования ледяного нагромождения перед сооружением. В ходе проведения в ледовом бассейне Крыловского научного центра исследований конкретных проектов дамб и других гидротехнических сооружений был получен ряд результатов, позволяющих судить об этом влиянии.

По ряду причин проведение экспериментов по определению уровня глобальной ледовой нагрузки на геометрически идентичные модели с каменной наброской и без нее оказалось невозможным, а сопоставить результаты удалось только для одной толщины довольно толстого ровного льда, а также для взаимодействия моделей с торосистым образованием. В табл. 1 приведены обобщенные результаты, относящиеся к близким, но не идентичным по геометрии моделям.

Представленные данные показывают, что уровень глобальной погонной горизонтальной нагрузки практически не зависит от состояния поверхности сооружения, величина же вертикальной погонной нагрузки может заметно изменяться.

Изучение надводных и подводных нагромождений перед различными морскими инженерными сооружениями — важная задача, актуальность которой обусловлена тем, что такие нагромождения не только оказывают существенное влияние на уровень воспринимаемой сооружением ледовой нагрузки, но и могут препятствовать выполнению различных технологических операций. В настоящее время наиболее полную информацию о таких нагромождениях можно получить при модельных испытаниях в ледовых бассейнах. Поэтому определенный интерес представляет исследование влияния каменной наброски на процесс образова-



Рис. 2. Модель гидротехнического сооружения с однослойным размещением щебня на наклонной поверхности. Фотография сделана при подготовке модельных испытаний в ледовом бассейне Крыловского центра  
Fig. 2. Model of hydraulic structure with a single-layer placement of crushed stone on an inclined surface. The photo was taken during the preparation of model tests in the ice tank of the Krylov Center



Рис. 3. Модель гидротехнического сооружения, предназначенная для изучения разрушения каменной наброски под действием льда. Фотография сделана при подготовке модельных испытаний в ледовом бассейне Крыловского центра  
Fig. 3. Model of hydraulic structure designed to study the distraction of rockfill under the ice impact. The photo was taken during the preparation of model tests in the ice tank of the Krylov Center

ния ледяных нагромождений, особенно в начальной стадии, поскольку именно в начале процесса создаются условия, которые в основном определяют конфигурацию нагромождения. Дело в том, что начиная с некоторого момента надвигающийся на сооружение лед взаимодействует только с уже образовавшимся нагромождением, а не с самим сооружением. Характер этого взаимодействия зависит от параметров сформированного начального нагромождения.

Визуальные наблюдения за начальным этапом формирования ледяного нагромождения перед сооружением подтвердили ранее отмечен-

Таблица 1. Максимальная погонная ледовая нагрузка

Ледовые условия	Погонная горизонтальная нагрузка, МН/м		Погонная вертикальная нагрузка, МН/м	
	без каменной наброски	с каменной наброской	без каменной наброски	с каменной наброской
Ровный лед толщиной 2,44 м	2,67	2,44	4,0	2,45
Торос с толщиной консолидированного слоя 2,42 м	1,35	1,32	2,23	1,19



Рис. 4. Профиль ледяного нагромождения при воздействии сплошного ровного льда. Фотография сделана в ходе модельных испытаний в ледовом бассейне Крыловского центра

Fig. 4. Profile of an ice heap exposed to solid even ice. The photo was taken during the model tests in the ice tank of the Krylov Center

ный результат [14], что при совпадении геометрических параметров исследуемых моделей наполнение льда происходит на меньшую дистанцию от уровня воды по наклонной грани сооружения с каменной наброской, чем для модели с ровной наклонной гранью. Это связано с возросшей «шероховатостью» наклонной поверхности, которая эффективно препятствует продвижению льдин по ней. В результате ледяное образование начинает формироваться на большем расстоянии от верхней отметки сооружения, что позволяет, используя горизонтальный участок бермы между верхним краем нижнего откоса и нижним краем верхнего откоса сооружения, сформировать хоть и значительное по размерам, но не представляющее опасности для материальных ценностей и оборудования объекта ледяное нагромождение (рис. 4).

Как уже отмечалось, исследование процессов разрушения каменной наброски при взаимодействии с ровным льдом осуществлялось в режиме прямого движения. Было исследовано воздействие двух полей сплошного ровного льда, которые отличались толщиной — 1,6 и 2,1 м в натуральных условиях. На рис. 5а показан один из моментов эксперимента, на рис. 5б — характер разрушения наброски.

Анализ результатов данных наблюдений за захватом камней льдом при его наполнении на наклонную плоскость показывает, что во льду меньшей толщины, как правило, наблюдается захват не более 5%

общего числа камней, формирующих поверхность сооружения на уровне воды. Важно отметить, что по данным наблюдений захват камней происходит только при первом контакте ледового поля с откосом. Протаскивание камней льдом наблюдалось на короткой дистанции, не превышающей 5 м для натурального сооружения при протяженности всего откоса около 20 м. Небольшое число имитаторов камня, которые были вырваны со своих мест и перенесены льдом на относительно небольшую дистанцию, не позволяет уверенно делать предположения относительно влияния на эти процессы таких факторов, как, например, масса отдельного камня, его форма, способ укладки и пр.

При воздействии ровного льда большей толщины наблюдается более интенсивное разрушение наброски. Как следует из приведенной на рис. 6 фотографии, разрушения затрагивают не только слой камней, который непосредственно находится у уреза воды, но и слой, располагающийся над ним (зеленые камни). При этом перенос камней льдом происходит на большую дистанцию (от 8 до 12 м для натурального сооружения). Увеличивается также объем разрушения, и можно констатировать, что в эксперименте было перенесено от 15% до 20% камней, находящихся на уровне воды, а также от 5% до 10% камней, формирующих откосную часть сооружения выше уровня воды. Можно предположить, что интенсивное разрушение слоя камней, находящегося на уровне воды, создает благоприятные условия для дальнейшего разрушения всей каменной наброски. Подъема камней льдом до уровня гребня откосного сооружения не наблюдалось ни в одном случае. В зонах сильного торошения льда при контакте с каменной наброской осуществлялся захват всех камней, формирующих поверхность, независимо от их массы. В зонах равномерного наполнения льда с умеренным



Рис. 5. Взаимодействие льда с многослойной наброской (а) и результаты разрушения наброски (б). Фотография сделана в ходе модельных испытаний в ледовом бассейне Крыловского центра

Fig. 5. Interaction of ice with multi-layered rockfill interaction (a) and results of rockfill destruction (b). The photo was taken during the model tests in the ice tank of the Krylov Center

торошением преимущественно отмечен перенос камней небольшой массы (до 8 т в пересчете на натурные условия).

#### Обсуждение результатов

Результаты измерения глобальной ледовой нагрузки, приведенные в табл. 1, позволяют сделать вывод, что состояние поверхности наклонного сооружения не оказывает существенного влияния на горизонтальную составляющую глобальной нагрузки. При этом величина вертикальной составляющей этой нагрузки заметно уменьшается. Выявленные закономерности могут быть объяснены следующим образом. Как уже отмечалось, каменная наброска способствует тому, что ледяное нагромождение начинает формироваться на большем расстоянии от верхней поверхности сооружения. Об этом свидетельствуют в частности данные табл. 1, относящиеся к вертикальной составляющей ледовой нагрузки. Причиной этого явления является повышенное трение между льдом и поверхностью сооружения. Таким образом, при наличии каменной наброски имеются два противоположных фактора, влияющих на величину глобальной ледовой нагрузки: повышенное трение, приводящее к ее возрастанию, и смещение ледяного нагромождения в сторону моря, снижающее нагрузку. В экспериментах эти оба



Рис. 6. Характер разрушения наброски при взаимодействии с толстым льдом. Фотография сделана в ходе модельных испытаний в ледовом бассейне Крыловского центра

Fig. 6. The result of rockfill destruction in the interaction with thick ice. The photo was taken during the model tests in the ice tank of the Krylov Center

фактора были примерно одинаковыми и компенсировали друг друга. Всегда ли выполняется это примерное равенство, пока сказать сложно, необходимы дополнительные экспериментальные исследования. По-видимому, уже сейчас можно с уверенностью утверждать, что применение каменной наброски не приводит к существенному возрастанию глобальной ледовой нагрузки на сооружение.

Величина ледяного нагромождения перед любым препятствием в основном определяется рядом факторов: протяженностью ледяного поля, взаимодействующего с сооружением, его толщиной, геометрией сооружения, в первую очередь его шириной, и глубиной акватории. Состояние поверхности сооружения оказывает влияние на процесс формирования ледяного нагромождения только в начальный момент. Тем не менее это влияние крайне важно, так как оно задает начальные и граничные условия для процесса формирования нагромождения. Наличие каменной наброски способствует тому, что формирование нагромождения начинается на большем расстоянии от верхней

поверхности сооружения. Это обстоятельство часто позволяет либо полностью защитить рабочие поверхности сооружения, либо заметно уменьшить негативные последствия воздействия льда. Еще одним положительным моментом в смещении ледяного нагромождения в сторону моря является создание благоприятных условий для глобального пролома льда у сооружения [11]. Такой глобальный пролом способствует перемещению значительной массы льда из надводного нагромождения под воду. При этом в зависимости от глубины акватории может произойти посадка подводного нагромождения на грунт, что является положительным фактором, так как приводит к некоторому снижению ледовой нагрузки на сооружение и способствует формированию защитного ледяного барьера перед ним [15].

Экспериментальные данные о разрушении каменной наброски льдом, насколько известно авторам работы, были получены впервые, поэтому их следует рассматривать как предварительные, требующие дальнейшего изучения и уточнения. Важным результатом можно считать вывод о том, что разрушение каменной наброски происходит при ее взаимодействии с передней кромкой надвигающегося поля ровного льда. Такой характер разрушения наблюдался во всех экспериментах. При этом при взаимодействии наброски с относительно тонким льдом (в проведенных экспериментах толщина такого льда составляла 1,6 м для натуральных условий) наблюдался эффект экранирования наброски обломками льда. Это происходит в случае, когда вновь наползающие части ледяного поля поднимаются на наклонную поверхность не по каменной наброске, а по обломкам льда, который ранее уже взаимодействовал с сооружением. Такая ситуация возможна для относительно тонкого льда, у которого обломки имеют меньшие размеры. Для более толстого льда эффект экранирования может не наблюдаться достаточно продолжительное время, что приводит к большему разрушению каменной наброски.

Наблюдения за процессом взаимодействия каменной наброски со льдом позволяют выделить два основных механизма ее разрушения. В первом случае происходит непосредственное вырывание камня из наброски. Обычно это происходит с камнями, которые имеют возвышение относительно поверхностного слоя наброски и слабо с ним связаны. Теоретические оценки, в которых однослойная каменная наброска представлялась в виде плотно упакованных шаров на плоскости [16], показывают, что из такой упаковки вывернуть шар не представляется возможным. Поэтому основной причиной, по которой камень может быть унесен льдом, является несовершенство случайной наброски камня.

С несовершенством случайной наброски камня связан и второй механизм разрушения. При случайной наброске между камнями могут образовываться пустоты. В [17] показано, что размеры этих пустот сопоставимы со средним размером камня. Наличие пустот делает возможным возникновение процессов

уплотнения наброски под действием ледовой нагрузки. При этом на отдельные камни могут действовать усилия, выдавливающие камень из наброски. Такие эффекты, когда камень, к которому еще не приблизилась кромка льда, начинал двигаться и выдавливаться из наброски, наблюдались в экспериментах.

Изучение процессов разрушения каменной наброски в экспериментальных условиях весьма затруднено тем, что формирующееся надводное нагромождение льда не дает возможности визуального наблюдения за этим процессом. Для более детального изучения разрушения каменной наброски было бы полезно использовать математическое моделирование этого процесса, например, методом дискретных элементов [18].

Таким образом, для повышения устойчивости каменной наброски к ледовым воздействиям необходимо стремиться к как можно более плотной упаковке камней в наброске, а также к более однородному по размерам составу камней. К сожалению, эти довольно очевидные рекомендации весьма сложно выполнить при реальном строительстве гидротехнических сооружений в Арктике.

### Выводы

В работе рассмотрены особенности взаимодействия каменной наброски портовых сооружений с дрейфующим льдом. Основное внимание было уделено влиянию наброски на уровень глобальной ледовой нагрузки на сооружение, формированию ледяных нагромождений перед сооружением, а также процессам разрушения наброски при воздействии льда. В результате можно сделать следующие выводы.

1. По предварительным данным, каменная наброска не приводит к увеличению горизонтальной ледовой нагрузки на сооружение, однако этот вывод еще требует дополнительных подтверждений.

2. По тем же данным, каменная наброска заметно снижает вертикальную составляющую глобальной ледовой нагрузки.

3. Каменная наброска способствует смещению надводного ледяного нагромождения в сторону моря от сооружения, что является благоприятным фактором, который в первую очередь обеспечивает повышение безопасности рабочих поверхностей сооружения.

4. Каменная наброска может разрушаться под воздействием льда. Эксперименты позволили выявить, что разрушение в основном происходит при взаимодействии наброски с кромкой надвигающегося ледяного поля. Могут реализоваться два сценария такого разрушения. Первый заключается в непосредственном выворачивании кромкой льда отдельных камней наброски, которые недостаточно сжаты соседними камнями и возвышаются над средним уровнем наброски. Второй сценарий состоит в выдавливании камней за счет внутренних усилий в наброске при ее взаимодействии со льдом. Такое выдавливание наблюдается в эксперименте с камнями, до которых кромка надвигающегося льда еще не дошла.

5. В целом можно констатировать, что каменная наброска может применяться для гидротехнических и портовых сооружений в условиях Арктики.

Работа выполнена как часть проекта «Исследование статистических закономерностей ледовых нагрузок на инженерные сооружения и разработка нового метода их вероятностного моделирования» № 0784-2020-0021 при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

### Литература

1. *Розачно С. И.* Проблемы проектирования морских портов в северных широтах // Гидротехника. — 2020. — № 4 (61). — С. 36—39.
2. *Тявлина Г. В., Вялый Е. А.* Применение природного камня в морском гидротехническом строительстве // Эколог. безопасность прибреж. и шельфовой зон моря. — 2022. — № 2. — С. 53—69. — DOI: 10.22449/2413-5577-2022-2-53-69.
3. *Смирнова Т. Г., Правдивец Ю. П., Смирнов Г. Н.* Берегозащитные сооружения. — М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2002. — 303 с.
4. *Завьялов В. К., Манойлин С. В., Миронов М. Е.* Конструирование и расчет набросных гидротехнических сооружений из фасонных блоков и массивов. — Л.: ЛВВИСУ, 1990.
5. СП 277.1325800.2016. Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования. — М., 2016.
6. СП 416.1325800.2018. Инженерная защита берегов приливных морей. Правила проектирования. — М., 2018.
7. ВСН 5—84/ММФ. Применение природного камня в морском гидротехническом строительстве. — М., 1984.
8. *Лаппо Д. Д., Стрекалов С. С., Завьялов В. К.* Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. — СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1990. — 432 с.
9. *Макаров К. Н., Чеботарев А. Г.* Волнозащитные наброски в корневых частях портовых молов // Инж.-строит. журн. — 2015. — № 3 (55). — С. 67—78. — DOI: 10.5862/МСЕ.55.8В.
10. *Магаровский В. В., Кузнецов А. А., Курчуков К. В.* Обеспечение безопасной эксплуатации ГТС на шельфе // Гидротехника. — 2019. — № 2 (55). — С. 14—16.
11. *Сазонов К. Е., Симакина А. А.* К вопросу об оценке размеров ледяного нагромождения перед препятствием // Мор. интеллект. технологии. — 2020. — № 4—3 (50). — С. 66—72. — DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.043.
12. *Розачно С. И., Шунько Н. В.* Научное сопровождение проектирования берегозащитных сооружений // Вестн. МГСУ. — 2016. — № 12. — С. 103—113. — DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.103-113.
13. *Сазонов К. Е.* Модельный и натурный эксперимент в морской ледотехнике. — СПб.: ФГУП «Крыл. гос. науч. центр», 2021. — 306 с.
14. *Добродеев А. А., Сазонов К. Е.* Физическое моделирование ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения. Откосные сооружения с наклонной гранью // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 90—100. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-90-100.
15. *Løset S. K., Shkhinek K. N., Gudmestad O. T., Høyland K.* Actions from Ice on Arctic Offshore and Coastal Structures. — Trondheim; St. Petersburg; Moscow; Krasnodar: Publisher «LAN», 2006. — 271 p.
16. *Слоэн Н. Дж. А.* Упаковка шаров // В мире науки. — 1984. — № 3. — С. 72—82.
17. *Дик И. Г., Дьяченко Е. Н., Миньков Л. Л.* Моделирование случайной упаковки шаров // Физ. мезомеханика. — 2006. — Т. 9, № 4. — С. 63—70.
18. *Добродеев А. А., Сазонов К. Е.* Моделирование в морской ледотехнике // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 4. — С. 557—567. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-557-567.

---

### Информация об авторах

*Добродеев Алексей Алексеевич*, кандидат технических наук, заместитель начальника лаборатории — начальник сектора, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3), e-mail: A\_Dobrodeev@ksrc.ru.

*Сазонов Кирилл Евгеньевич*, доктор технических наук, начальник лаборатории, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3), e-mail: kirsaz@rambler.ru.

### Библиографическое описание данной статьи

*Добродеев А. А., Сазонов К. Е.* О воздействии льда на каменную наброску портовых сооружений // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 1. — С. 97—105. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-97-105.

## ICE IMPACT ON THE ROCKFILL OF PORT FACILITIES

Dobrodeev, A. A., Sazonov, K. E.

Krylov State Research Centre, Saint-Petersburg State Marine Technical University (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on September 19, 2022

### Abstract

The paper presents the experimental results of model tests in the ice tank of the Krylov State Research Center aimed at study the features of ice interaction with rockfill of hydraulic engineering structures. These rockfills are often used in port protective structures (dams, breakwaters, etc.). The main attention during the model tests was paid to the study of the rockfill influence on the total ice load, the process of ice heap formation in front of the structure, as well as the rockfill destruction under the ice impact. The experiments have shown that the horizontal component of the total ice load changes a little, while the vertical component noticeably decreases. It has been found that the rockfill displaces the ice formation towards the sea thus helps to protect the working surfaces of the hydraulic structure from ice impact. The tests have revealed that the rockfill of hydraulic structure can be destroyed by the drifting ice and identified two possible scenarios for this destruction. The results allow the authors to conclude about the rockfill for hydraulic structure designed for the Arctic.

**Keywords:** *ice load, ice heap, ice model tank, destruction, friction.*

This work was carried out as a part of project 0784-2020-0021 “Investigation of the statistical regularities of ice loads on engineering structures and the development of a new method for their probabilistic modeling” with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

### References

1. Rogachko S. I. The problems of seaports designing in northern region. *Gidrotekhnik*, 2020, no. 4 (61), pp. 36—39. (In Russian).
2. Tlyavlina G. V., Vyalyj E. A. The natural stone using in marine hydraulic engineering construction. *Ecological safety of the coastal and shelf zones of the sea*, 2022, no. 2, pp. 53—69. DOI: 10.22449/2413-5577-2022-2-53-69. (In Russian).
3. Smirnova T. G., Pravdivets Yu. P., Smirnov G. N. Coastal protection structures. Moscow, Izd-vo Assoc. stroit. vuzov, 2002, 303 p. (In Russian).
4. Zav'yalov V. K., Manoilin S. V., Mironov M. E. Design and calculation of bulk hydraulic structures from shaped blocks and arrays. Leningrad, LVVUSU, 1990. (In Russian).
5. SP 277.1325800.2016. Coastal protection structures. Design rules. Moscow, 2016. (In Russian).
6. SP 416.1325800.2018. The shores engineering protection of tidal seas. Design rules. Moscow, 2018. (In Russian).
7. VSN 5—84/MMF. The use of natural stone in marine hydraulic engineering construction. Moscow, 1984. (In Russian).
8. Lappo D. D., Strekalov S. S., Zav'yalov V. K. Loads and effects of wind waves on hydraulic structures. St. Petersburg, VNIIG im. B. E. Vedeneeva, 1990, 432 p. (In Russian).
9. Makarov K. N., Chebotarev A. G. Wave protection sketches in the root parts of the harbor breakwaters. *Engineering and construction mag.*, 2015, no. 3 (55), pp. 67—78. DOI: 10.5862/MCE.55.8B. (In Russian).
10. Magarovskii V. V., Kuznetsov A. A., Kurchukov K. V. Ensuring the safe operation of hydraulic structures on the shelf. *The hydraulic engineering*, 2019, no. 2 (55), pp. 14—16. (In Russian).
11. Sazonov K. E., Simakina A. A. On the question of estimating the size of an ice pile up in front of an obstacle. *The Marine Intelligent Technologies*, 2020, no. 4—3 (50), pp. 66—72. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.043. (In Russian).
12. Rogachko S. I., Shun'ko N. V. Scientific support for the design of coastal protection structures. *Vestnik MGSU*, 2016, no. 12, pp. 103—113. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.103-113.
13. Sazonov K. E. Model and full-scale experiment in marine ice engineering. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2021, 306 p. (In Russian).
14. Dobrodeev A. A., Sazonov K. E. Physical modeling of ice load on extended hydraulic constructions. Sloping constructions with an inclined edge. *Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy]*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 90—100. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-90-100. (In Russian).
15. Løset S., Shkhinek K. N., Gudmestad O. T., Høyland K. V. Actions from ice on Arctic Offshore and Coastal Structures. Trondheim; St. Petersburg; Moscow; Krasnodar, Publ. “LAN”, 2006, 271 p.
16. Sloen N. J. A. Balls packing. In *the world of science*, 1984, no. 3, pp. 72—82. (In Russian).

17. Dik I. G., D'yachenko E. N., Min'kov L. L. The modeling of balls random packing. *Physical mesomechanics*, 2006, vol. 9, no. 4, pp. 63—70. (In Russian). [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11. no. 4, pp. 557—567. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-557-567. (In Russian).
18. Dobrodeev A. A., Sazonov K. E. Modeling in marine ice engineering. *Arktika: ekologiya i ekonomika*.

---

### **Information about the authors**

**Dobrodeev, Aleksei Alekseevich**, PhD of Engineering Science, Deputy Ice Laboratory Head, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), Chief Lecturer, St. Petersburg State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, Russia, 190121), e-mail: A\_Dobrodeev@ksrc.ru.

**Sazonov, Kirill Evgen'evich**, Doctor of Engineering Science, Ice Laboratory Head, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, Russia, 190121), e-mail: kirsaz@rambler.ru.

### **Bibliographic description of the article**

**Dobrodeev, A. A., Sazonov, K. E.** Ice impact on the rockfill of port facilities. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2023, vol. 13, no. 1, pp. 97—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-97-105. (In Russian).

© Dobrodeev A. A., Sazonov K. E., 2023