

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА ПРОТЯЖЕННЫЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ. ОТКОСНЫЕ СООРУЖЕНИЯ С НАКЛОННОЙ ГРАНЬЮ

А. А. Добродеев, К. Е. Сазонов

Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 5 августа 2020 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований с моделями протяженных гидротехнических сооружений с наклонной стенкой, выполненных в лаборатории «Ледовый опытовый бассейн» Крыловского государственного научного центра. Проанализированы возможности применения метода физического моделирования процессов взаимодействия таких сооружений со льдом в ледовом бассейне. Полученные результаты позволяют рекомендовать метод физического моделирования в качестве одного из основных подходов при изучении особенностей взаимодействия гидротехнических сооружений со льдом. Данные модельного эксперимента могут быть использованы для построения математических моделей протекающих процессов, а также для уточнения требований нормативных документов.

Ключевые слова: *протяженное гидротехническое сооружение, глобальная ледовая нагрузка, погонная ледовая нагрузка, навал льда, наклонная стенка.*

Введение

В предыдущей работе [1] были детально рассмотрены результаты модельных экспериментов по определению глобальной и погонной ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения с вертикальной стенкой. В данной работе рассматриваются и обсуждаются результаты экспериментов с моделями откосных гидротехнических сооружений, имеющих наклонную грань по фронту воздействия ледяного покрова. К таким сооружениям в первую очередь относятся дамбы и ледозащитные сооружения, строящиеся для защиты акваторий портов от негативного воздействия волнения и дрейфующего льда, а также протяженные опорные основания гравитационного типа.

При проектировании такого рода сооружений вопрос определения воздействующей на них глобальной и погонной ледовой нагрузки не является самым главным. Как правило, такие сооружения

представляют собой довольно массивные конструкции, для которых вероятность сдвига под действием ледовой нагрузки незначительна. При рассмотрении процессов взаимодействия этих конструкций со льдом на первый план выходят вопросы изучения параметров образовавшихся перед ними ледяных нагромождений и напоязания льда на поверхность, где могут быть расположены инженерные постройки, трубопроводы, автодорога, а также изучение условий, при которых может произойти опасный навал льда на дамбу, поиск конструктивных и оперативных решений, препятствующих развитию этого нежелательного явления. Описываемые и анализируемые в данной статье эксперименты были выполнены в ледовом опытовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» [2; 3].

Требования нормативных документов

Основной нормативный документ, регламентирующий методы определения ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения, — СП 38.13330.2018

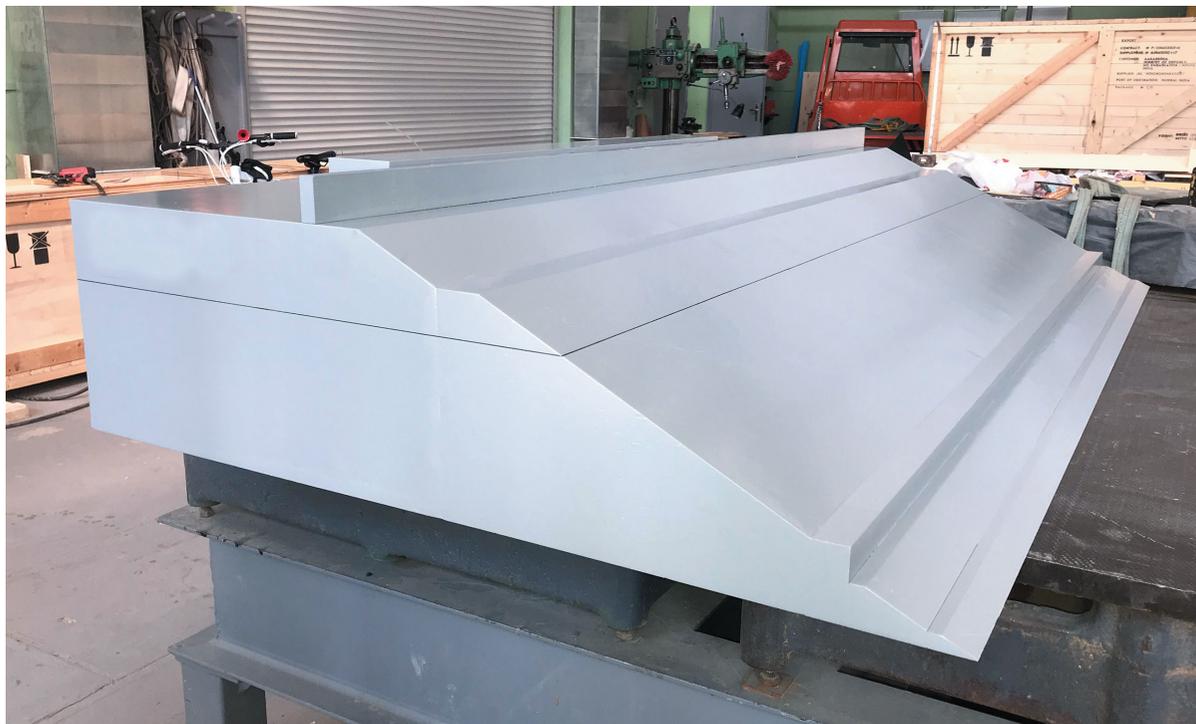


Рис. 1. Физическая модель элемента соединительной дамбы
Fig. 1. The physical model of a connecting dam element

«Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» [4]. В нем определяются сценарии взаимодействия со льдом различных по конструктивному типу сооружений. В соответствии с темой исследования рассмотрим более подробно, как нормативный документ предлагает определять ледовую нагрузку на протяженное сооружение с наклонной гранью.

При воздействии ровного льда на сооружение с наклонной гранью ледовая нагрузка определяется по формулам:

- горизонтальная составляющая силы

$$F_h = k_\beta k_\Delta R_f b_s h_d \operatorname{tg}(\beta + \operatorname{arctg} f) + m_h \left[1 + A_1 (f - 0,1) + A_2 (f - 0,1)^2 \right] b_s; \quad (1)$$

- вертикальная составляющая силы

$$F_v = k_\beta k_\Delta R_f b_s h_d + m_v \left[1 + A_3 (f - 0,1) \right] b_s, \quad (2)$$

где β — угол наклона грани сооружения; k_β , k_Δ , A_1 , A_2 , A_3 , m_h , m_v — коэффициенты, задаваемые в зависимости от угла наклона грани сооружения и толщины льда [4]; f — коэффициент трения между льдом и поверхностью сооружения; R_f — предел прочности льда на изгиб, МПа.

Анализ приведенных формул показывает, что они не содержат составляющих, зависящих от скорости дрейфа льда. Они практически соответствуют некоторому начальному этапу взаимодействия со-

оружения со льдом, так как не учитывают процесс формирования у сооружения ледяных нагромождений, хотя такая ситуация возможна при частых подвижках ледяного покрова и неизбежна во время ледохода на реках. При этом ледяные нагромождения и навал льда являются одной из главных опасностей при эксплуатации протяженных гидротехнических сооружений.

Для пологих откосов гидротехнических сооружений навал льда на них может быть рассчитан по методике, изложенной в [5]. Подход, основанный на применении механики сыпучей среды, изложен в [6]. Однако эти важные процессы взаимодействия еще недостаточно изучены, поэтому в настоящее время для их исследования крайне важна роль физического моделирования, которое позволяет наблюдать их развитие.

Описание экспериментов

Общие особенности проведения эксперимента с моделями протяженных гидротехнических сооружений были рассмотрены в работе [1]. Ниже подробно описываются эксперименты с моделью сооружения с наклонной стенкой.

В ходе исследований была использована одна модель с наклонными гранями, которая моделировала некоторый участок защитной дамбы общей длиной примерно 1,5 км. Была изготовлена модель дамбы в масштабе 1:60 (рис. 1). Поскольку головная и корневая части дамбы в данном случае не являлись элементами исследуемой модели, ее боковые стен-

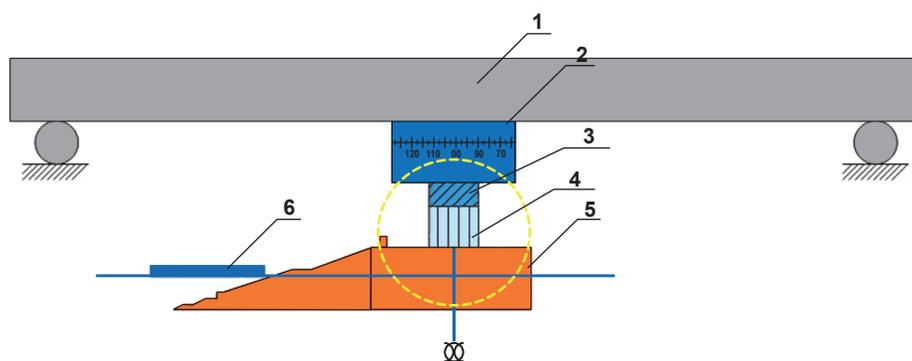


Рис. 2. Схема проведения эксперимента: 1 – буксировочная тележка, 2 – устройство для моделирования направления дрейфа льда, 3 – шестикомпонентный динамометр, измеряющий ледовую нагрузку, 4 – модель дамбы, 5 – жесткая проставка между динамометром и моделью, 6 – ледяной покров

Fig. 2. The test scheme: 1 – towing carriage, 2 – device for modeling the direction of ice drift, 3 – 6-component dynamometer, measuring ice load, 4 – dam model, 5 – rigid spacer between the dynamometer and the model, 6 – ice cover

ки были выполнены вертикальными, поэтому изучалось только фронтальное воздействие ледяного покрова. Ширина модели дамбы уменьшена по сравнению с натурным сооружением, и ее модель изготовлена несимметричной, т. е. без моделирования насыпи с внутренней части акватории терминала. Наклонная поверхность модели имеет специальное покрытие, позволяющее моделировать требуемый коэффициент трения льда по поверхности каменной насыпки. При этом необходимо учитывать тот факт, что в ходе эксплуатации дамбы ее поверхность может обмерзнуть, что снизит коэффициент трения между наползающим ледяным покровом и каменной насыпкой. Такой сценарий следует считать оптимистическим по отношению к моделируемому, так как при нем аккумуляция льда на надводной части дамбы будет снижаться за счет более эффективного смещения ледяных нагромождений в воду под действием собственного веса.

На рис. 1 хорошо видно, что наклонная грань дамбы может иметь довольно сложный профиль, геометрические характеристики которого неизбежно будут оказывать влияние на величину ледовой нагрузки и размеры ледяных нагромождений. Поверхность дамбы может быть оснащена ледозащитной стенкой, концепция которой также присутствует на модели, что дополнительно препятствует наползанию льда и повреждению объектов инфраструктуры, расположенных за ней. Поэтому помимо определения ледовой нагрузки при проведении экспериментов особое внимание уделяется изучению процессов формирования ледяных навалов на дамбу.

Программа экспериментов с моделью дамбы похожа на описанную в [1]. Основное отличие состоит в том, что изучался только случай фронтального воздействия льда на модель, при котором угол между вектором скорости дрейфующего льда и наклонной гранью дамбы составляет 90° . В выполнявшихся экспериментах регистрировались шесть компонент глобальной ледовой нагрузки, осуществлялись фото- и видеофиксация происходящих процессов, а также

выполнялись измерения геометрических параметров ледяных нагромождений, образовавшихся перед моделью, и обломков льда, наползающих на поверхность. Эксперименты проводились в сплошных ровных и торосистых льдах в режиме обращенного движения, его схема представлена на рис. 2.

Для более точного изучения особенностей процессов формирования надводного ледяного нагромождения у дамбы и навала льда на нее была выполнена еще одна серия опытов. Испытания проводились в режиме прямого продвижения льда. Движение ледяного покрова обеспечивалось буксировочной тележкой бассейна, которая толкала моделированный лед с помощью специального бульдозера. Для этой серии была использована максимально приближенная к реальным условиям модель участка дамбы. Она изготовлена из натурального камня, массогабаритные характеристики которого в масштабе соответствовали фракции и массе каменной отсыпки натурной дамбы. Камни были уложены в точном соответствии с профилем дамбы (рис. 3). Для исключения осыпания камней с краев дамбы и для организации наблюдения за наползанием льда в ходе эксперимента были установлены листы из прозрачного оргстекла, а также упорная конструкция в основании, моделирующая так называемый упорный камень натурального сооружения. Модель дамбы была установлена в конце ледового бассейна в районе расположения слипа, что обеспечило эффективный отвод уже использованного ледяного поля.

В этих экспериментах не было возможности измерять ледовую нагрузку, поэтому основное внимание было уделено наиболее полной фиксации формирования ледяного нагромождения перед моделью дамбы. Испытания в режиме прямого движения проводились только в ровном ледяном покрове.

Анализ и обсуждение результатов

Взаимодействие с ровным ледяным покровом. В табл. 1 приведены некоторые результаты исследования особенностей взаимодействия мо-

дели дамбы с ровным льдом, в том числе значения погонной нагрузки, которая определялась как среднее значение пиковых нагрузок. Ввиду малости, вызванной симметрией относительно продольной плоскости, поперечная составляющая нагрузки P_y не приводится.

Представляет интерес сравнение уровня полученной в эксперименте погонной ледовой нагрузки с аналогичной нагрузкой, полученной в опытах с моделями с вертикальной стенкой. Для сооружения с вертикальной стенкой и толщины льда 2,44 м при скорости дрейфа 1,28 м/с была зафиксирована погонная нагрузка 2,4 МН/м, а при скорости дрейфа 0,30 м/с — 2,6 МН/м [1]. Эти значения отличаются от данных, приведенных в табл. 1, на 7% и –4% соответственно. Можно констатировать, что по результатам испытаний величины погонной нагрузки, найденные по среднепиковым значениям суммарной глобальной нагрузки, для сооружений с вертикальной и наклонной гранями практически совпадают.

Этот факт свидетельствует, что характер ледяного нагромождения и его размеры играют определяющую роль в формировании ледовой нагрузки. Форма взаимодействующей со льдом грани определяет ледовую нагрузку только в начальной стадии процесса взаимодействия. Дальнейший рост нагрузки в основном зависит от параметров нагромождения. По-видимому, этот вывод справедлив для любых морских и гидротехнических инженерных сооружений. Но для протяженных гидротехнических сооружений этот вывод особенно важен, так как большая протяженность объекта полностью исключает влияние процессов уноса обломков льда от сооружения на величину воспринимаемых им ледовых сил.

Сказанное подтверждается при сравнении временных реализаций продольного погонного ледового усилия, действующего на соору-



Рис. 3. Модель участка дамбы, изготовленная путем отсыпки камней
Fig. 3. Dam section model, made by filling stones

жение с вертикальной и наклонной гранями. На рис. 4 представлены данные модельного эксперимента, в котором модели сооружений исследовались во льду толщиной 2,4 м с одинаковой скоростью 1,28 м/с. На этом рисунке очень четко видно различие между изучаемыми процессами на их начальной стадии. Но примерно через 200—250 с различие постепенно исчезает. За указанное время сооружение взаимодействует примерно с 250—300 м дрейфующего льда. Указанного количества льда хватит, чтобы создать перед сооружением сидящее на дне акватории ледяное нагромождение размером в несколько десятков метров. В дальнейшем сооружение взаимодействует со льдом через это нагромождение.

Можно предположить, что морфологические характеристики ледяных нагромождений, образующихся перед сооружениями с вертикаль-

Таблица 1. Максимальные среднепиковые значения погонной ледовой нагрузки от ровного льда, пересчитанной на натурные условия

Относительная глубина воды D/h_p , м	Скорость дрейфа льда V , м/с	Измеренные продольные составляющие погонной ледовой нагрузки	
		P_x , МН/м	P_z , МН/м
<i>Ровный ледяной покров. Толщина льда h_l 1,5 м</i>			
7,9	1,28	1,2	2,6
7,9	0,70	1,4	2,4
7,9	0,30	1,4	2,3
<i>Ровный ледяной покров. Толщина льда h_l 2,4 м</i>			
4,8	1,28	2,6	4,1
4,8	0,70	2,7	4,0
4,8	0,30	2,5	3,9

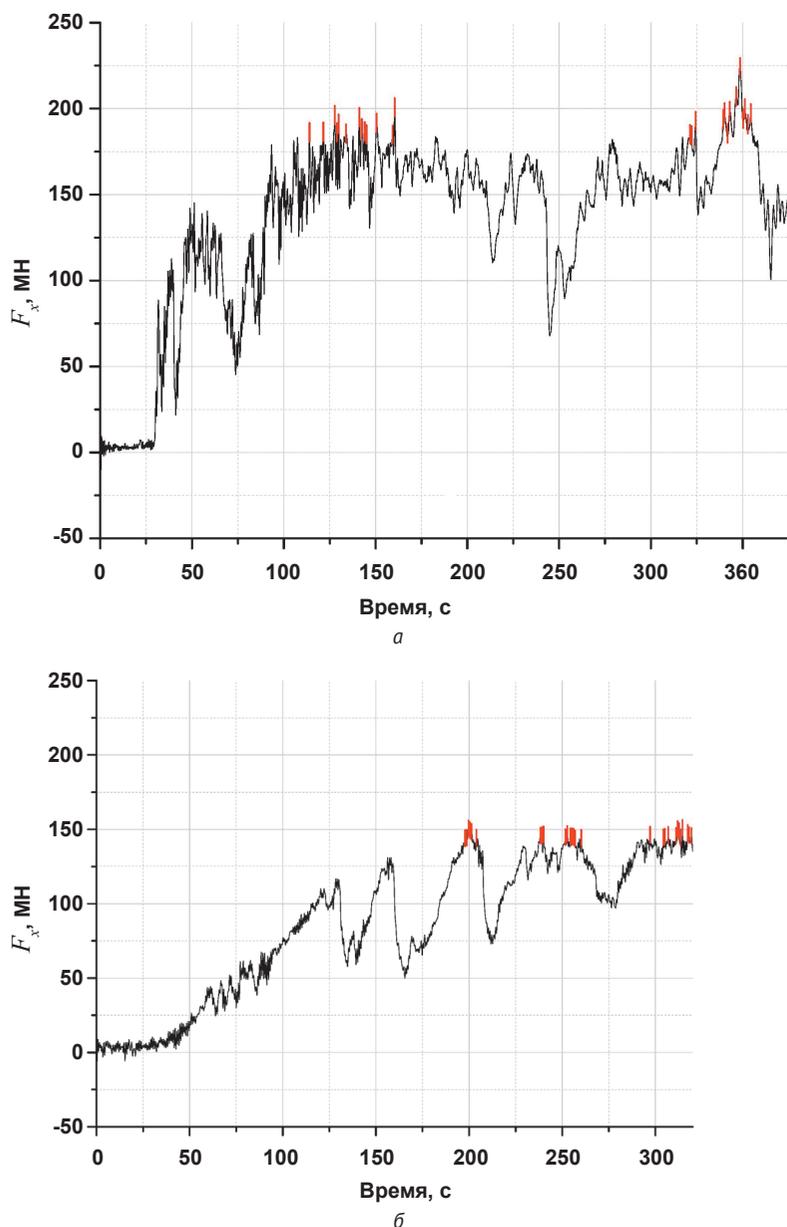


Рис. 4. Временные реализации продольной составляющей ледовой нагрузки на сооружении с вертикальной (а) и наклонной (б) стенкой
Fig. 4. The time histories of longitudinal ice load on constructions with vertical (a) and sloping (inclined) (b) walls

ной стенкой и с наклонной стенкой, будут различны (рис. 5). В первом случае нагромождение формируется из относительно небольших обломков льда, что повышает его коэффициент заполнения и делает более плотным. Во втором случае нагромождение создается из крупных обломков льда, полученных при изгибе ледяного покрова. Оно должно содержать больше пустот, быть менее плотным. В какой-то мере это подтверждается данными рис. 4. На этом рисунке хорошо видно, что первый «глобальный» пролом ледяного поля под весом надводного нагромождения произошел на 75-й секунде. Аналогичный пролом у сооружения с наклонной гранью произошел только примерно на 130-й секунде. Косвенно это свидетельствует о том, что нагромождение перед наклонной стенкой достаточно долго набирало необходимый для пролома вес.

Взаимодействие с торосистыми образованиями. Был изготовлен модельный торос с глубиной килля 15,0 м и толщиной консолидированного слоя 2,42 м применительно к натурным условиям.

При взаимодействии откосной дамбы с торосом наблюдаются такие типы разрушения консолидированного слоя, как изгиб и раскалывание на крупные фрагменты. Ледяное нагромождение образуется в самой начальной фазе взаимодействия сооружения с торосом за счет скопления разрушенных обломков льда и килля тороса до дна акватории. Результаты измерений погонной ледовой нагрузки, полученные в ходе эксперимента с торосом, таковы:

- ледовые условия: торос, $H_{к.с.} = 2,4$ м, $H_k = 15,0$ м, скорость дрейфа льда 0,3 м/с;
- продольные составляющие погонной ледовой нагрузки: $P_x = 1,4$ МН/м, $P_z = 2,2$ МН/м.

Сравнение этих данных с аналогичными результатами, полученными на модели с вертикальной стенкой (погонная нагрузка $P_x = 2,53$ МН/м) [1], показывает, что для наклонной грани наблюдается существенное снижение нагрузки. Несомненно, приводимые результаты носят единичный характер, и на их основании нельзя делать обобщающие выводы. Тем не менее полученный результат может быть удовлетворительно объяснен с помощью довольно известной модели взаимодействия сооружения с торосистым образованием [7], в соответствии с которой рассматриваются два процесса разрушения килля тороса при его взаимодействии с сооружением — локальное разрушение килля и его глобальный сдвиг. Эти процессы конкурируют друг с другом. На начальном этапе внедрения сооружения в торосистое образование превалируют процессы локального разрушения, так как для глобального сдвига тороса требуются очень большие усилия. По мере внедрения сооружения в торос возрастают усилия, необходимые для локального разрушения, а усилие,



а

б

Рис. 5. Характер распределения ледяных нагромождений возле модели причала с вертикальной стенкой (а) и модели дамбы с наклонной гранью (б). Толщина льда 2,4 м. Протяженность воздействия льда 400 м
Fig. 5. Distribution pattern of ice accumulations near the model of a berth with a vertical wall (а) and the model of a dam with an inclined edge (б). Ice thickness 2.4 m. Extension of ice impact 400 m

требуемое для глобального сдвига, уменьшается, поскольку из-за внедрения в торос снижается площадь поверхности сдвига. При некоторой величине внедрения сооружения в торос эти силы сравниваются, и происходит глобальное разрушение кия тороса сдвигом.

Если применить описанные выше основные положения теоретической модели к наклонной грани сооружения, то процесс ее взаимодействия с торосом можно описать следующим образом. Наиболее вероятно, что взаимодействие торосистого образования с сооружением с наклонной стенкой начинается не на уровне ватерлинии, а с взаимодействия кия с подводной частью наклонной грани. Возникающие при этом ледовые силы скорее всего вызовут локальные разрушения кия тороса сдвигом. Это предположение базируется на том, что нижняя часть кия тороса состоит из слабосвязанных блоков льда. Температура этих блоков близка к температуре замерзания воды [8], что не способствует образованию прочных связей между блоками. Также способствует развитию сдвиговых процессов небольшая величина возможных поверхностей сдвига. Таким образом, на начальных этапах взаимодействия тороса с наклонной стенкой происходит активное сдвиговое разрушение

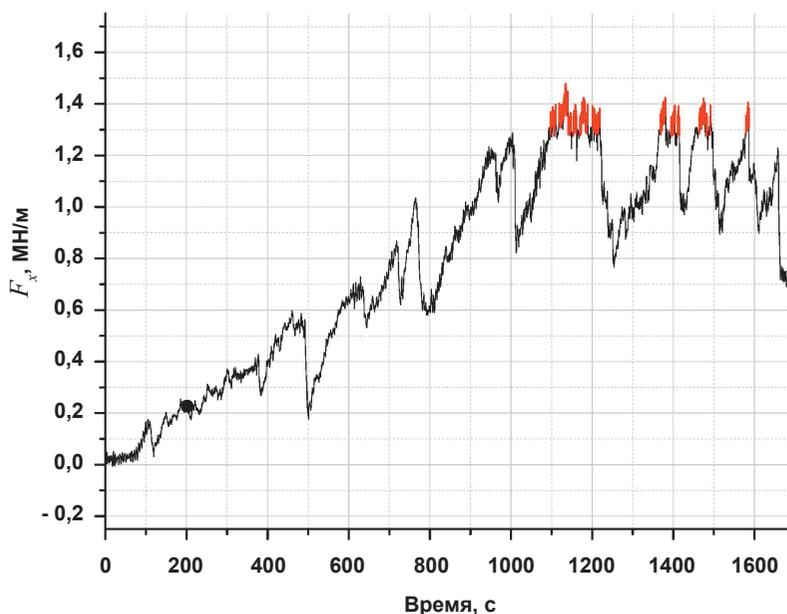


Рис. 6. Продольная составляющая ледовой нагрузки от тороса
Fig. 6. Longitudinal component of ice load during ice hummock

его кия. По всей видимости, небольшие сбросы ледовой нагрузки, которые можно видеть на временной реализации процесса (рис. 6), возникли из-за этих сдвиговых процессов.

С какого-то момента с торосом взаимодействует вся наклонная грань. При этом могут протекать как процессы локального разрушения тороса, так и локальные сдвиговые (там, где это возможно). Общая нагрузка на сооружение оказывается ниже из-за эффекта наклонной стенки, общий глобальный сдвиг может наступить несколько раньше, чем на вертикальной стенке, из-за того, что киль тороса подвергался более интенсивному разрушению при взаимодействии с наклонной подводной частью сооружения.

Испытания модели в режиме прямого надвигания льда. Проведение экспериментов путем прямого надвигания ледяного покрова или с помощью обращенного движения в неподвижном ледяном покрове дает схожую картину взаимодействия сооружения со льдом. Однако при использовании метода обращенного движения модель



Рис. 7. Характер воздействия льда на модель дамбы с каменной отсыпкой
Fig. 7. The nature of the ice impact on the model of the dam with a stone filling

должна быть закреплена на буксировочной тележке с помощью динамометра, предел измерений которого ограничен. Поэтому применение тяжелой или имеющей сопоставимые с шириной бассейна габариты модели порой недопустимо. При реализации эксперимента путем прямого надвигания льда расположение модели осуществляется на естественном жестком основании бассейна, моделирующем дно акватории, поэтому ограничения по весу или габаритам модели практически отсутствуют.

В ходе экспериментальных исследований модели дамбы с моделируемой каменной отсыпкой протяженность элемента была соизмерима с протяженностью модели, изготовленной из пенопласта для исследований методом обращенного движения. Для создания модели использовалось несколько видов камней, отличающихся фракцией, подобранной в соответствии с исходными данными и масштабом моделирования (рис. 7).

При проведении эксперимента с насыпной моделью важными задачами были:

- оценка влияния высоты напоя льда на откосное сооружение с учетом неравномерности расположения камней друг относительно друга;
- разрушение каменной отсыпки под действием льда;
- сопоставление визуальной картины разрушения льда и образования ледяных нагромождений с данными эксперимента методом обращенного движения.

Проведенные исследования показали, что для составленной из камней модели напоя льда осуществляется на меньшую дистанцию от уровня

воды по наклонной грани сооружения, чем в случае модели, изготовленной из пенопласта. Это легко объяснить изменением в большую сторону коэффициента трения льда по поверхности модели, измерения которого были выполнены для обоих типов моделей. При этом понятие «коэффициент трения» в случае измерений на образце модели с каменной отсыпкой имеет некоторую условность. Дело в том, что увеличение силы трения вызвано не столько шероховатостью поверхности камней, сколько смятием льда при протаскивании образца по неровной поверхности дамбы. Временная реализация имеет ярко выраженный скачкообразный характер (рис. 8). Пиковые нагрузки соответствуют промежутку времени, когда образец разрушался о неровные участки каменной отсыпки. Факт разрушения смятием также доказывается взвешиванием образца льда после каждого пробега, которое демонстрировало снижение его массы на значительную величину (5—10%). Полученные результаты требуют более глубокого изучения, однако свидетельствуют о консервативности метода обращенного движения, когда напояние льда по гладкой ровной поверхности откосного профиля дамбы происходит беспрепятственно и обусловлено только моделируемым коэффициентом трения.

В ходе экспериментов с моделью дамбы также наблюдается захват отдельных камней крупными фрагментами ледяного покрова в начальной стадии взаимодействия. Этот результат, фиксируемый на видеокамеру, служит критерием оценки степени разрушаемости дамбы под действием ледовых нагрузок. Как правило, разрушение каменной от-

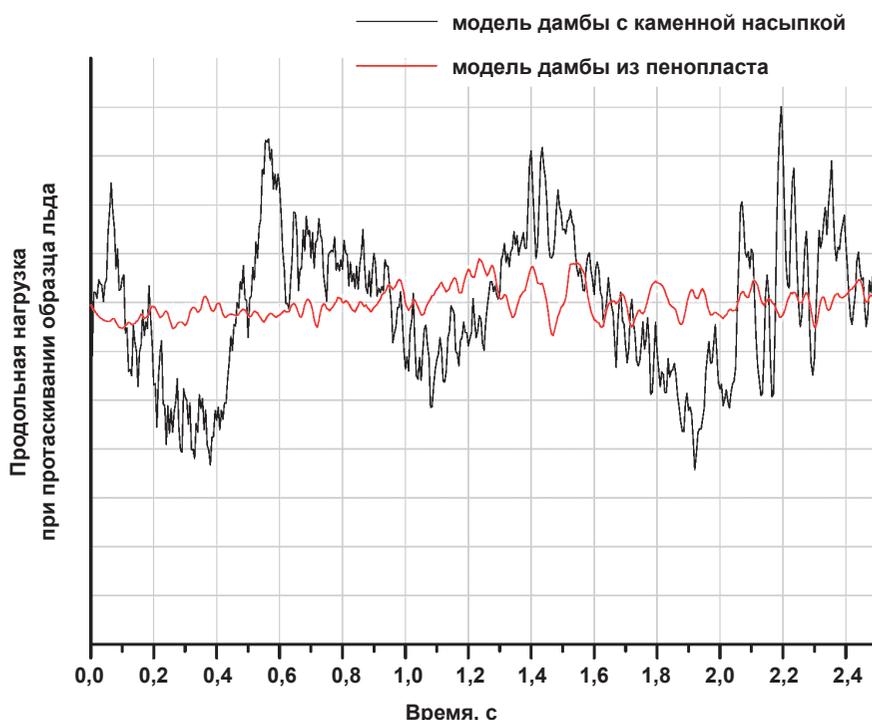


Рис. 8. Временная реализация силы при протаскивании образца льда по двум типам моделей дамбы в ходе измерений коэффициента трения

Fig. 8. The time history of the force when pulling the ice sample according to two types of dam models during measurements of the friction coefficient

сыпки происходит в начальной фазе контакта со льдом. Так как процесс взаимодействия льда и сооружения на данном этапе не носит циклического характера, захват камней по мере увеличения протяженности ледового воздействия прекращается, а на поверхности дамбы образуется стационарное ледяное нагромождение. Увеличение языка нагромождения генерирует фазу циклического характера взаимодействия ледяного покрова и дамбы, однако результат, полученный в опытовом бассейне, не позволяет оценить его реальную длину в зависимости от времени воздействия. Это утверждение касается только длительных промежутков времени. В эксперименте ограниченная ширина преграды способствует приданию языку нагромождения обтекаемой формы в определенный момент, что останавливает рост его длины. В реальных же условиях значительная протяженность дамбы, наличие береговой зоны как минимум с одной из ее сторон делают процесс роста длины языка нагромождения практически бесконечным и зависящим от подвижности ледяных полей в рассматриваемой акватории. Как правило, акватории в зоне расположения дамб характеризуются наличием припайного льда, подвижки которого обусловлены воздействием внешних факторов, таких как судоходство или резкие перепады метеоусловий от нормальных к экстремальным, что в итоге приводит к его разрушению.

Основываясь на вышесказанном, зависимость длины языка нагромождения от времени воздей-

ствия ледяного покрова при использовании частичных моделей гидротехнических сооружений следует определять с соблюдением следующего критерия. При прекращении роста длины языка нагромождения и начале интенсивного уноса обломков льда за пределы частичной модели сооружения эксперимент следует останавливать. В случае необходимости получения данных о длине языка нагромождения при более длительном дрейфе нужно либо изготовить модель элемента сооружения большей протяженности, либо провести экстраполяцию уже имеющихся результатов экспериментальных исследований. При этом оценки предельной ледовой нагрузки на подобные сооружения в ходе экспериментов в ледовом бассейне, как уже отмечалось, являются корректными на любой стадии их выполнения, так как после закрепления ледяного нагромождения на дне нагрузка перераспределяется, и рост ее максимальных значений больше не наблюдается.

Проведенные исследования с насыпной моделью показали, что умеренная детализация ее конструкции при обязательном соблюдении критериев моделирования позволяет выявить новые особенности ледового воздействия при испытаниях в ледовом бассейне. В дополнение к определенным ледовым нагрузкам с использованием классической модели сооружения из пенопласта раскрыты новые особенности напоязания льда на гидротехнические сооружения с неровной поверхностью. Это дает основания для отработки экспериментальным путем новых

эффективных и более дешевых по сравнению с отдельно стоящими ледозащитными сооружениями и дополнительными стенками методов борьбы с образованием значительных ледяных нагромождений на поверхности сооружений и с наполнением льда.

Выводы

Приведенные в статье результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

Один из важнейших результатов выполненных экспериментов — утверждение о выравнивании уровня ледовой нагрузки на инженерное сооружение после образования перед ним ледяного нагромождения. Этот вывод, неоднократно обсуждавшийся специалистами по ледотехнике, до сих пор не является общепризнанным. Этому препятствуют малое количество экспериментальных данных, а также трудности в их сопоставлении из-за различий в ледовых условиях, геометрических параметрах сооружений и глубине акватории перед ними. В проанализированных в статье экспериментах в какой-то мере удалось выполнить исследование в однородных условиях. Несомненно, для окончательного решения этого вопроса требуется проведение дополнительных исследований.

Выполненные эксперименты убедительно доказывают, что, как и в случае сооружений с вертикальной гранью, для сооружений с наклонной стенкой большое влияние на уровень ледовой нагрузки оказывают процессы формирования ледяных нагромождений перед сооружениями. Поэтому одной из актуальных задач продолжает оставаться разработка теории формирования таких нагромождений, позволяющая создать схемы для более точного расчета ледовой нагрузки и геометрических характеристик нагромождения, а также для оценки вероятности попадания льда в рабочие зоны инженерных сооружений.

Перспективным направлением исследований представляются эксперименты, в которых моделируется структура поверхности сооружения, контактирующей со льдом. На наш взгляд, в подобных экспериментах более детально моделируются процессы контактного взаимодействия поверхности сооружения со льдом в условиях действия повышенных давлений. Как показывает ряд исследований, эти процессы не всегда можно свести к простому изменению коэффициента кулоновского трения [9;

10]. Поэтому в таких экспериментах может быть получена наиболее точная информация о процессах формирования ледяных нагромождений.

Работа выполнена как часть проекта 0784-2020-0021 при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Литература

1. Добродеев А. А., Сазонов К. Е. Физическое моделирование ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения. Сооружения с вертикальной стенкой // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 4 (40). — С. 77—89. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-77-89.
2. Денисов В. И., Сазонов К. Е., Тимофеев О. Я. Новые экспериментальные возможности Крыловского государственного научного центра по изучению ледовых воздействий на объекты морской техники // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 3 (19). — С. 76—81.
3. Боруевич В. О., Русецкий А. А., Сазонов К. Е., Соловьев И. А. Современные гидродинамические лаборатории. — СПб.: ФГУП «Крылов. гос. науч. центр», 2019. — 316 с.
4. СП 38.13330.2018 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.04-82*. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/553863434>.
5. Ледяные образования морей Западной Арктики / Под ред. д-ра геогр. наук Г. К. Зубакина. — СПб.: АНИИ, 2006. — 272 с.
6. Осипенко Н. М. О модели развития навала льда у преграды // Науч.-техн. сб. «Вести газовой науки». — 2018. — № 4 (36). — С. 131—138.
7. 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.
8. Марченко А. В. Моделирование консолидации и таяния торосов // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2007. — Вып. 34 (318). — С. 97—138.
9. Епифанов В. П. Физические механизмы контактного разрушения льда // Докл. Акад. наук. — 2007. — Т. 412, № 1. — С. 39—43.
10. Епифанов В. П. Влияние промежуточного слоя на прочность соединения льда с подложкой // Докл. Акад. наук. — 2007. — Т. 472, № 1. — С. 27—32.

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), старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29), 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), ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29), e-mail: kirsaz@rambler.ru.

Библиографическое описание данной статьи

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.

PHYSICAL MODELING OF ICE LOAD ON EXTENDED HYDRAULIC CONSTRUCTIONS. SLOPING CONSTRUCTIONS WITH AN INCLINED EDGE

Dobrodeev A. A., Sazonov K. E.

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

The article was received on August 5, 2020

Abstract

The authors present the results of experimental studies of ice interaction with models of extended hydraulic constructions with a sloping wall carried out in the laboratory “Ice tank” of Krylov State Research Centre. The researchers analyze the possibilities of applying the method of physical modeling to investigate the processes of ice-structure interaction using ice tank. The results make it possible to recommend the method of physical modeling as one of the main approaches for studying the interaction of hydro-technical installations with ice. The data of the model experiment can be used to construct mathematical models of ice breaking mechanism, as well as to clarify the requirements of regulatory documents.

Keywords: extended hydraulic construction, global ice load, linear ice load, ice pileup, sloping wall.

This work was carried out as a part of project 0784-2020-0021 with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

References

1. Dobrodeev A. A., Sazonov K. E. Fizicheskoe modelirovanie ledovoi nagruzki na protyazhennyye gidrotekhnicheskiye sooruzheniya. Sooruzheniya s vertikal'noi stenкой. [Physical modeling of ice load on extended hydraulic constructions. The vertical wall constructions]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2020, no. 4 (40), pp. 77—89. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-77-89. (In Russian).
2. Denisov V. I., Sazonov K. E., Timofeev O. Ya. Novyye eksperimental'nyye vozmozhnosti Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra po izucheniyu ledovoykh vozdeystviy na ob"ekty morskoy tekhniki. [New experimental capabilities of the Krylov State Research Center for study of ice impact on marine equipment]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2015, no. 3 (19), pp. 76—81. (In Russian).
3. Borusevich V. O., Rusetskii A. A., Sazonov K. E., Solov'ev I. A. Sovremennyye gidrodinamicheskiye laboratorii. [The modern hydrodynamic laboratories]. St. Petersburg, FGUP “Krylov. gos. nauch. tsentr”, 2019, 316 p. (In Russian).
4. SP 38.13330.2018 Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskiye sooruzheniya (volnovyye, ledovyye i ot sudov). SNIIP 2.06.04-82*. [SP 38.13330.2018 Loads and interaction with hydro-technical installations (wave and ice loads, loads from ships. SNIIP 2.06.04-82*). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/553863434>. (In Russian).
5. Ledyanye obrazovaniya morei Zapadnoi Arktiki. [Ice features of West Arctic seas]. Pod red. d-ra geogr. nauk G. K. Zubakina. St. Petersburg, AANII, 2006, 272 p. (In Russian).

6. Osipenko N. M. O modeli razvitiya navala l'da u pregrady. [About mathematical model of ice encroachment near barrier]. Nauch.-tekhn. sb. "Vesti gazovoi nauki", 2018, no. 4 (36), pp. 131—138. (In Russian).
7. 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.
8. Marchenko A. V. Modelirovanie konsolidatsii i tayaniya torosov. [The modelling of consolidation and melting of ice ridges]. Trudy TsNII im. akad. A. N. Krylova, 2007, iss. 34 (318), pp. 97—138. (In Russian).
9. Epifanov V. P. Fizicheskie mekhanizmy kontaktnogo razrusheniya l'da. [The Physical mechanisms of ice breaking]. Dokl. Akad. nauk, 2007, vol. 412, no. 1, pp. 39—43. (In Russian).
10. Epifanov V. P. Vliyaniye promezhutochnogo sloya na prochnost' soedineniya l'da s podlozhkoi. [Influence of the intermediate layer on the strength of the ice-substrate bond]. Dokl. Akad. nauk, 2007, vol. 472, no. 1, pp. 27—32. (In Russian).

Information about the authors

Dobrodeev Aleksei Alekseevich, PhD of Engineering Science, Head of Ice Researching Section, 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), Senior Researcher, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29, Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg, Russia, 195251), e-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru.

Sazonov Kirill Evgenevich, Doctor of Engineering Science, Head of Ice Laboratory, 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), Leading Researcher, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29, Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg, Russia, 195251), e-mail: kirsaz@rambler.ru.

Bibliographic description

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).

© Dobrodeev A. A., Sazonov K. E., 2021