Гидротехническое строительство

DOI: https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-12
УДК 620.1.08:624.145:691.322

П.В. Анохин, А.Т. Беккер, Т.Э. Уварова, Е.Е. Помников

АНОХИН ПАВЕЛ ВИКТОРОВИЧ – научный сотрудник, anohin.pv@dvfu.ru
БЕККЕР АЛЕКСАНДР ТЕВЬЕВИЧ – д.т.н., профессор, SPIN: 3956-2515, ResearcherID: AAB-8482-2020, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2899-7995, ScopusID: 35610298200, bekker.at@dvfu.ru
УВАРОВА ТАТЬЯНА ЭРИКОВНА – д.т.н., профессор (автор, ответственный за переписку), SPIN: 6005-1621, ResearcherID: G-7681-2016, ORCID: orcid.org/0000-0002-9147-5145, ScopusID: 7003267351, uvarova.tye@dvfu.ru
ПОМНИКОВ ЕГОР ЕВГЕНЬЕВИЧ – к.т.н., профессор, SPIN: 6250-4710, pomnikov.ee@dvfu.ru
Департамент морских арктических технологий Политехнического института
Дальневосточный федеральный университет
Владивосток, Россия

Методики определения степени сопротивления бетона ледовой абразии (обзор)

Аннотация: Одной из основных проблем освоения углеводородных ресурсов шельфовых месторождений в арктических и субарктических морях являются ледовые нагрузки и воздействия на морские нефтегазовые гидротехнические сооружения (МНГС), прежде всего наименее изученное абразионное воздействие ледяного покрова на МНГС. Разработка методов прогнозирования степени абразионного износа элементов конструкций МНГС в течение их срока службы имеет большое значение для оценки надежности сооружений. Практика показывает, что железобетонные МНГС получили предпочтение во многих проектах по обустройству месторождений нефти и газа на континентальном шельфе, что объясняется их преимуществами при эксплуатации в условиях морской среды на известных глубинах шельфа. Ледовая абразия со временем может привести к разрушению защитного слоя бетона опорной конструкции МНГС и к оголению арматуры, что недопустимо с точки зрения безопасности эксплуатации таких уникальных сооружений. Поэтому защита бетона конструкций МНГС от ледовой абразии – весьма актуальная научная проблема. Действующие методики проектирования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений не регламентируют параметры сопротивления бетона ледовой абразии, что обусловило необходимость проведения соответствующих теоретических и экспериментальных исследований по истиранию бетона льдом. В статье дается обзор методов экспериментального определения сопротивления материалов ледовой абразии. Сложность задачи наглядно иллюстрируется многообразием подходов к конструкциям и методам испытаний. Авторы представляют уникальный стенд для испытаний материалов на ледовую абразию, разработанный на основе анализа мирового опыта и собственных многолетних исследований.
Ключевые слова: ледовая абразия, бетон, шельфовое сооружение, испытание

Введение

Исследования в области истирающих воздействий от дрейфующего ледяного покрова на морские гидротехнические сооружения ведутся длительное время. Их актуальность обусловлена сложностью процессов разрушения ледяных образований при взаимодействии с сооружением, большим разбросом физико-механических характеристик льда, недостаточным

© Анохин П.В., Беккер А.Т., Уварова Т.Э., Помников Е.Е., 2021
Статья: поступила: 05.02.2021; рецензия: 15.02.2021; финансирование: Дальневосточный федеральный университет.

объемом натурных данных как по ледовой нагрузке, так и по ледовой абразии, несогласованностью экспериментальных исследований на сопротивление материалов ледовой абразии и, как следствие, отсутствием в нормативной литературе [1, 2, 6, 7 и др.] рекомендаций по расчету толщины ледозащитного приспособления в соответствии с износостойкостью материалов (бетон, металл, покрытие) к ледовым истирающим воздействиям.

Высокая динамика воздействия ледяного покрова способствует разрушению опор морских инженерных сооружений от ледовой абразии. Натурные наблюдения за износом материала конструкций от истирающего воздействия льда показали, что скорость абразии бетона может достигать следующих значений: 0,9÷1,6 мм/год – по наблюдениям S. Huovinen [17]; 0,2÷11,6 мм/год – на маяках в Балтийском море (исследования J. Janson) [23, 24]; 1,0÷5,0 мм/год – для опор мостов в устьях рек (F. Hara) [15, 16] и 0,3 мм/год – мост Конфедерации в Канаде, по данным J.P. Newhook и D.J. McGuinn [28].

В соответствии с концепцией расчета глубины ледовой абразии [8, 10–12] решение этой проблемы может быть разделено на две части: ледовые воздействия, вызывающие абразию, и сопротивление материала конструкции истирающему воздействию льда. Для решения проблемы ледовых истирающих воздействий необходимо иметь математический аппарат расчета контактного давления льда и длины пути истирания [8, 10–12].

Проблема сопротивления материала истиранию льдом решается путем проведения экспериментальных исследований, на основе которых определяется эмпирическая зависимость интенсивности ледовой абразии от основных параметров, вызывающих абразию материала (контактное давление, температура льда, скорость взаимодействия и длина пути истирания). Эмпирическая модель ледовой абразии характеризует способность материала сопротивляться ледовым истирающим воздействиям и отражает физические процессы при истирании материала льдом.

Первые попытки экспериментально установить сопротивление различных материалов ледовой абразии были сделаны более 40 лет назад [31]. Для проведения подобного типа испытаний разрабатывались специальные установки.

При этом условия проведения эксперимента должны были удовлетворять следующим требованиям:

- контроль давления на контакте, температуры и скорости,
- обеспечение простого и точного способа количественной оценки глубины ледовой абразии;
- возможность воспроизведения и верификации результатов испытаний.

Качество постановки и проведения эксперимента зависит от ряда особенностей оборудования, а именно:

- кинематической схемы взаимодействия испытуемого образца и блока льда;
- диапазона изменения переменных факторов;
- количества контролируемых величин.

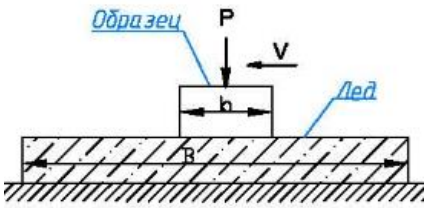
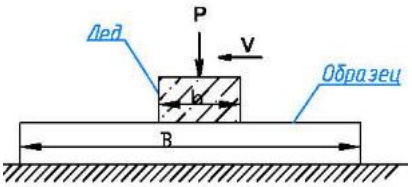
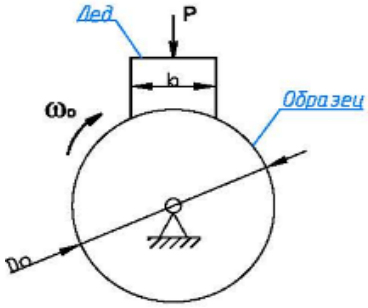
Основные рассматриваемые в работе установки имеют кинематические схемы, представленные в табл. 1.

Попытки разработать универсальную исследовательскую методику оценки сопротивления материалов ледовой абразии, повторяющую условия контакта и изменчивость природных факторов, практически невыполнимы, что обусловлено невозможностью обеспечить в экспериментах изменчивость всего спектра этих природных факторов, описывающих ледовую обстановку морских акваторий. Кроме того, инженерные сооружения могут иметь различные конфигурации в зоне, взаимодействующей со льдом, которые пока не учитываются при испытаниях. Это задачи пространственного описания формирования ледовых нагрузок и воздействий на сооружения любой конфигурации.

В настоящей статье мы представляем обзор испытательных установок и сравниваем условия проведения экспериментов для выработки рекомендаций по созданию методики оценки сопротивления материалов ледовой абразии на основе моделирования процессов взаимодействия в системе «лед–материал» «в точке» зоны воздействия льда на сооружения.

Таблица 1

Кинематические схемы взаимодействия

Схема 1 возвратно-поступательного движения испытуемого образца по блоку льда	Схема 2 возвратно-поступательного движения блока льда по испытуемуму образцу	Схема 3 вращательного типа при боковом истирании испытуемого образца
		
Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Россия, 2009, 2015, 2020); Научно-исследовательский институт строительства в холодных регионах (Саппоро, Япония, 2012)	Норвежский университет науки и техники (Тронхейм, Норвегия, 2009–2019)	Мемориальный университет Ньюфаундленда (Сент-Джонс, Канада, 2018)

Обзор экспериментальных установок и условий проведения испытаний на сопротивление материалов ледовой абразии

Следует отметить, что в статье не рассматриваются испытательные стенды для исследований материалов на сопротивление ледовой абразии, которые были проведены без использования льда, например стенд Центра технических исследований Финляндии [17]. Указанное время проведения испытаний условно (ориентировочно), в зависимости от имеющейся информации в открытой печати.

Хокайдский университет, Саппоро, Япония (1981, 1988)

Начиная с **1981 г.** группа японских ученых под руководством профессора H. Saeki [30, 31] проводила исследования коэффициента трения между морским льдом и строительными материалами (бетон, сталь) на установке, представленной на рис. 1 (кинематическая схема 2). Оборудование позволяло использовать образцы различных строительных материалов, а также изменять нормальное напряжение и относительную скорость перемещения.

Образец материала закреплялся на передвижной платформе, которая перемещалась при помощи гидравлического домкрата. Блок морского льда помещался над образцом и оставался неподвижным относительно платформы. Статическая вертикальная нагрузка создавалась за счет изменения количества грузов на перекладине (рис. 1). Цель эксперимента – изучение влияния условий его проведения – контактного давления, анизотропных свойств льда (направления его роста), относительной скорости, температуры – на процесс ледовой абразии материала.

В 1988 г. H. Saeki с соавторами [30, 31] разработана новая установка, которая основана на кинематической схеме 1 (рис. 2). Затем, с 1988 по 1997 г., Y. Itoh и другие [19–21] провели лабораторные испытания ледовой абразии строительных материалов на этой установке. Образец бетона, зафиксированный на подвижной плите, совершал возвратно-поступательные движения, при этом регулировалась их скорость, изменялось давление на контакте, а ледяная крошка удалялась при помощи воздушного потока той же температуры, что и образец льда.

Ширина блока льда и образца составляла 8 и 10 см соответственно, края обоих концов образца бетона не имели контакта с блоком льда (рисунки 3 и 4), что позволяло использовать

эти края как исходные ориентиры при измерении глубины абразии. В данном исследовании глубина абразии определялась как средняя на 5 поперечных линиях (рис. 4).

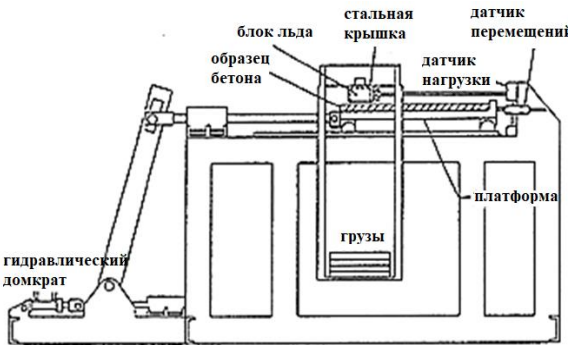


Рис. 1. Стенд Хоккайдского университета [31]

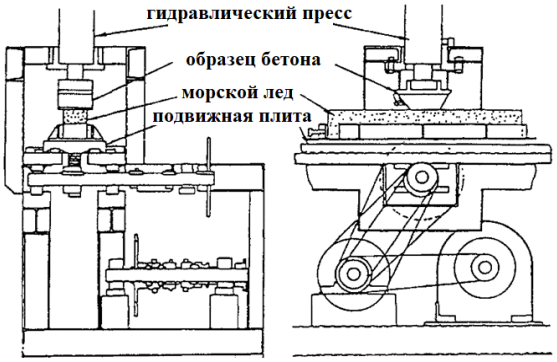


Рис. 2. Стенд Хоккайдского университета [19]

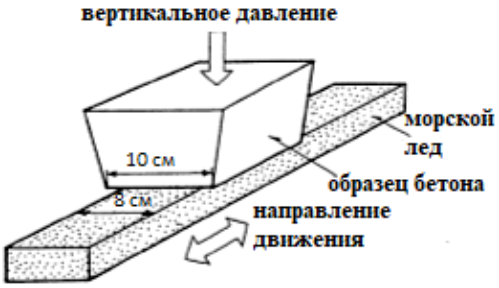


Рис. 3. Схема проведения эксперимента [19]

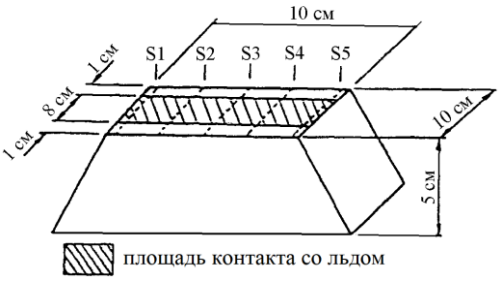


Рис. 4. Образец бетона [19]

Научно-исследовательский институт строительства в холодных регионах, технологический институт Хачинохе, Саппоро, Япония (2012)

В 2012 и 2014 гг. S. Kioka и др. [25, 26] провели исследования на установке, основанной на кинематической схеме 1 (рис. 5), с целью определения износа металлических образцов от истирающего воздействия льда. Аналогом послужил стенд Y. Itoh (1988) [19].

Образец (сталь) в держателе скользит по модельному блоку льда шириной 8 см, высотой 5–10 см, длиной 70 см, установленному в стальной опалубке, при этом необходимое давление создается гидравлическим домкратом. Как показано на рис. 5, поверхность трения располагалась параллельно поверхности модельного льда, а приложенное давление – перпендикулярно поверхности образца льда, чтобы смоделировать условия, близкие к реальным. Образец материала (сталь) имеет длину 10 см в направлении трения, ширину 8 см (такую же, как у призмы модельного льда). Для предотвращения разрушения льда краями образца была снята фаска – приблизительно 5 мм. В результате видимая площадь контакта со льдом составила 9×8 см.

Поверхность образца была обработана путем фрезерования до шероховатости 6S. Трение образца о блок льда осуществлялось возвратно-поступательными движениями с определенной скоростью и амплитудой 30 см. Основной принцип движения реализован вращением шарико-винтовой передачи с помощью серводвигателя переменного тока, что позволило создать механизм, обеспечивающий стабильное трение скольжения на большом расстоянии и возможность измерения нагрузки в горизонтальном и вертикальном направлениях и перемещения в направлении для оценки силы трения и контактного давления.

Испытание проводилось в морозильной камере с контролируемой температурой при –10 °С. Контактное давление (определяемое путем деления вертикальной нагрузки на видимую площадь контакта) находилось в диапазоне от 0,01 до 1,6 МПа со средним значением 0,6 МПа. Скорость движения изменялась от 0,01 до 0,15 м/с со средним значением, приблизительно равным 0,06 м/с. Максимальный путь истирания составлял около 50 км и в исключительном случае – 125 км. При высоком контактном давлении испытания прекратились после 26 км из-за повреждения блока льда.

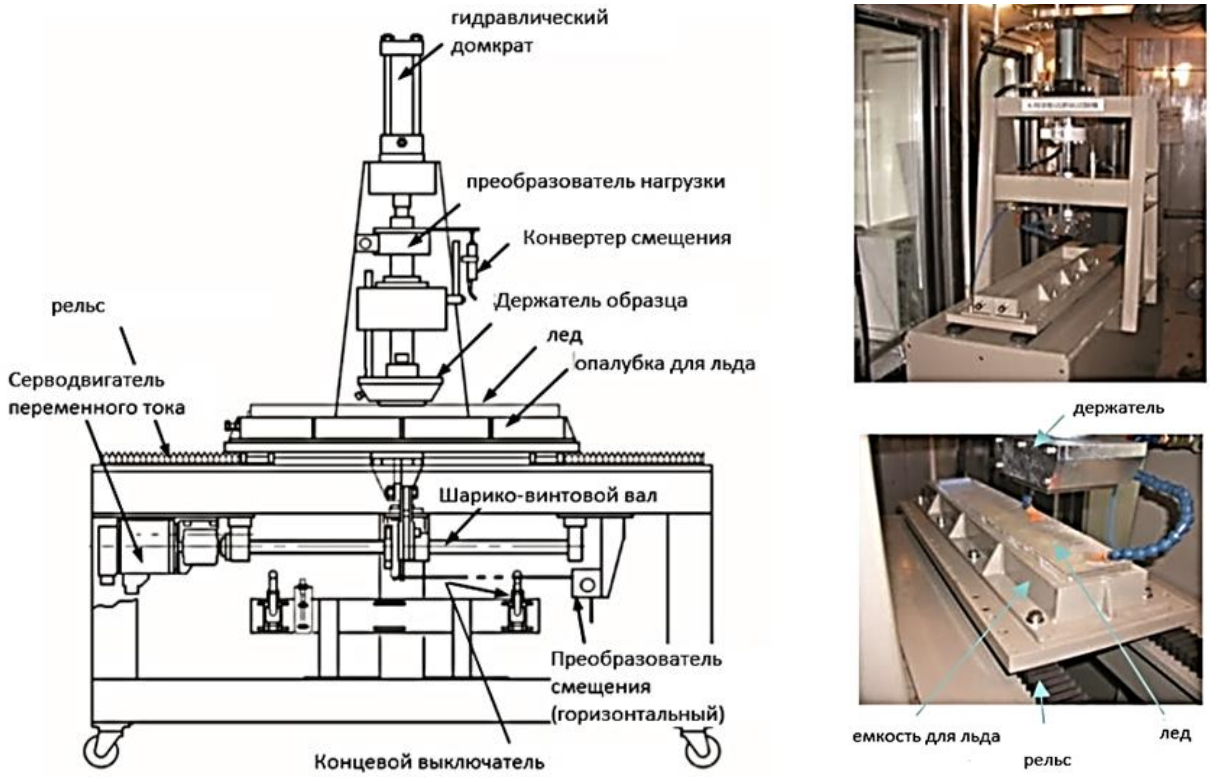


Рис. 5. Стенд научно-исследовательского института строительства в холодных регионах, Саппоро, Япония, 2012 [25]

Канадский гидравлический центр Национального исследовательского совета Канады, Оттава, Канада (2001)

В 2001 г. R. Frederking и A. Barker [14] провели исследования по определению коэффициентов трения между льдом и строительными материалами в ледовом бассейне длиной 21, шириной 7 и глубиной 1,2 м, оборудованном буксирующей тележкой мощностью 50 кН, которая может перемещаться по всей длине бассейна (рис. 6). Ледовый бассейн расположен в помещении, где можно изменять температуру воздуха для каждой серии опытов в диапазоне от –10 до –20 ºС. Для испытаний в соответствии с кинематической схемой 2 (табл. 1) использовалась буксировочная тележка, которая перемещала блок льда относительно образцов различных строительных материалов, прикрепленных к полу бассейна.

Рис. 6. Ледовый бассейн Канадского гидравлического центра, испытательное устройство, вид сбоку, Оттава, Канада [14]

Оборудование состояло из стойки, прикрепленной к передней части каретки, и системы рычагов, предназначенных для поддержания держателя льда в постоянном положении относительно поверхностей испытуемых образцов. Гидравлический цилиндр, отвечающий за прижим блока льда к испытуемым образцам, мог контролировать давление. Образцы льда были закреплены в алюминиевых формах, разработанных специально для того, чтобы надежно удерживать лед в процессе проведения опыта. Эти формы крепились с помощью направляющих и зажимного механизма в нижней части оборудования.

На конце стойки, прикрепленной болтами к каретке, установили видеокамеру Super-VHS и подсветку для записи испытаний. Камера находилась на расстоянии 1,4 м от испытательных образцов, закрепленных болтами по всей длине резервуара. Небольшие расстояния между образцами были перекрыты кусочками окрашенных фанерных разделителей. Высоты образцов и разделителей располагались на уровне ± 0,5 мм. Общая схема испытательного устройства в ледовом бассейне с образцами показана на рис. 6.

Основной инструмент для измерения сил трения – шестикомпонентный динамометр (Advanced Mechanical Technologies Inc. MC6-4000), прикрепленный к нижней части держателя. Образец льда и монтажная пластина были прикреплены непосредственно к нижней части динамометра с помощью зажимного механизма. Динамометр измерял нормальную силу в направлении движения и поперечную силу, перпендикулярную направлению движения, а также три связанных момента. Датчик линейного перемещения измерял вертикальное смещение носителя и, таким образом, давал представление об истирании образцов во время испытания. Тахометр на двигателе с электроприводом на каретке обеспечивал измерение ее скорости.

Система охлаждения помещения поддерживала необходимую температуру для серии опытов, при которой лабораторию оставляли перед испытаниями на несколько часов, чтобы позволить образцам бетона достичь равномерной температуры. Размеры всех образцов: длина – 100 и ширина – 30 см.

Экспериментальная установка Мемориального университета Ньюфаундленда, Канада (2017)

В 2017 г. A. Ryan, S. Bruneau, B. Colbourne [29] провели испытания образцов бетона на ледовую абразию. В экспериментальных исследованиях использовался токарный станок (рис. 7), расположенный в морозильной камере. Бетонные цилиндры размером 100x200 мм помещались в токарный вращательный патрон, в то время как образцы льда располагались сверху на закругленной бетонной стороне, что соответствует кинематической схеме 3 (табл. 1).

Образцы бетона представляли собой цилиндры диаметром 100 и высотой 200 мм (рис. 8). Предварительно образцы были разлинованы вертикально в четырех местах на равные части, а также в трех местах его центральной части, где линии располагались в зоне взаимодействия со льдом. Для документирования и визуального наблюдения за истиранием поверхности бетона сделаны фотографии до и после испытаний каждого образца (рис. 8).

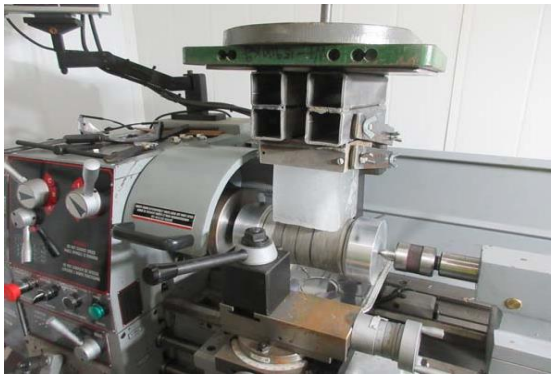


Рис. 7. Экспериментальная установка [29]

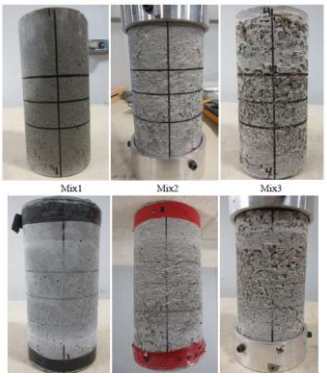


Рис. 8. Образцы бетона до (наверху) и после (внизу) испытаний [29]

Длина пути истирания образца составляла 10 км, т.е. 318 301 оборот бетонного цилиндра. Скорость вращения вала станка находилась в диапазоне от 84,8 до 84,9 об/мин, что соответствовало скорости на контакте – около 0,445 м/с.

Температура помещения не контролировалась, ее диапазон – от +15 до +26 °С (только одно испытание было проведено при температуре –10 °С). Бетонные цилиндры, блоки льда и кронштейн для их крепления хранились в различных холодильниках и морозильных камерах для поддержания постоянной температуры от испытания к испытанию.

Норвежский университет науки и техники, Тронхейм, Норвегия (2009)

Начиная с 2009 г. S. Jacobsen с коллегами на базе ледовой лаборатории Норвежского университета науки и техники переделали и адаптировали установку для исследований грунтов на сдвиг под испытательный стенд для оценки сопротивления образцов бетона истирающему воздействию льда (рис. 9) [13, 22, 27, 32, 33]. В установке использовался принцип трения-скольжения в соответствии с кинематической схемой 2 (табл. 1).

Блок льда, закрепленный в держателе через поршень 1 (рис. 9) непрерывно прижимается к бетонной поверхности, совершая при этом возвратно-поступательные движения вдоль неподвижного образца бетона. Система датчиков поддерживает постоянное давление во время всего испытания при движении вперед и назад, при этом стандартные отклонения давления составляли ± 0,05 и ± 0,19 МПа.

Для устранения проблемы образования наледи во время проведения испытаний контрольровалась температура образца бетона путем его подогрева через алюминиевую нагревательную пластину 4 (рис. 9), которая находится под образцом бетона. Температура бетонной поверхности в зоне контакта измерялась инфракрасным сканером, при этом температура верхней поверхности бетонных образцов должна быть равной +11, +12 и +8 °С для температур окружающей среды –5, –10 и –20 °С соответственно. Такие температуры поверхности характерны для центральной области бетонных образцов. Размеры образцов бетона превышали размеры блока льда, а неистертые края бетонного образца использовались для измерений глубины ледовой абразии. При данном испытании износ материала льдом был незначителен, поэтому для измерения его величины требовалось высокоточное оборудование.

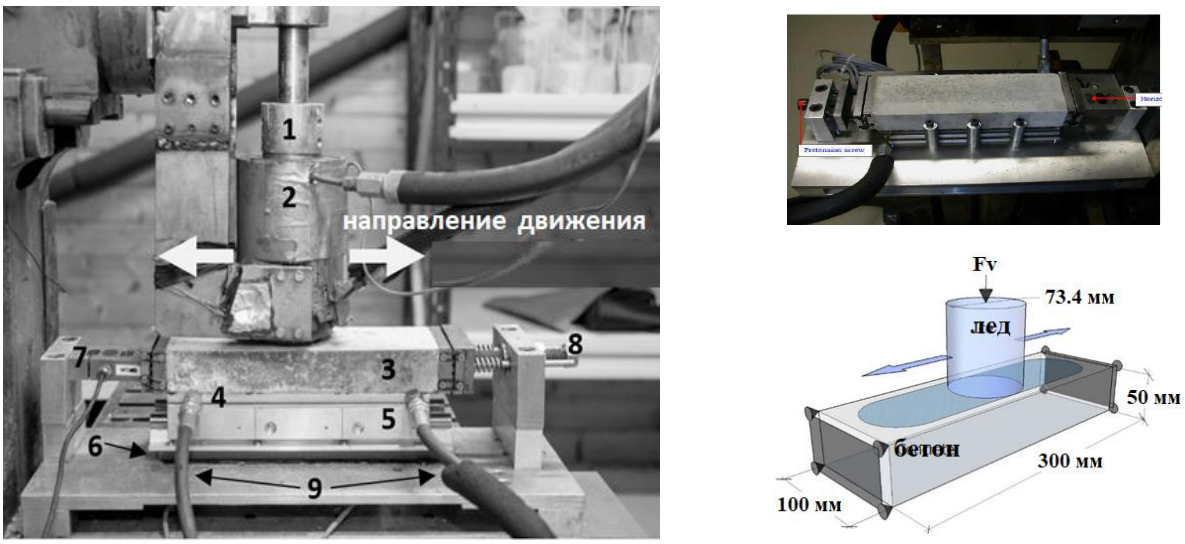


Рис. 9. Испытательный стенд Норвежского университета науки и техники, Тронхейм. Норвегия, 2009 [13, 32]:
1 – поршень; 2 – держатель льда; 3 – образец бетона; 4 – алюминиевая нагревательная пластина; 5 – линейная система скольжения; 6 – вертикальные тензодатчики (не видны под системой скольжения 5); 7 – горизонтальные тензодатчики; 8 – регулировочный винт; 9 – вход и выход нагревательной жидкости)

Испытания проводились в морозильной камере, где имелась возможность варьировать температуру от -5 до -20 °С: большинство экспериментов выполнялось при температуре в лаборатории –10 °С. Контактное давление варьировалось от 0,5 до 1,5 МПа, скорости – от 0 до 20 см/с. В процессе испытаний контролировались следующие параметры: горизонтальное положение блока льда, вертикальная и горизонтальная нагрузки, температура окружающего воздуха.

Основные трудности в процессе испытаний – необходимость менять блоки льда, так как скорость износа блока льда составила 1,5–3,0 мм/мин, при этом замена блоков изношенного льда на новые, более холодные, снижала эффект ледовой абразии бетонных образцов. Кроме того, при смене направления движения на противоположное в концевых точках наблюдались значительные изменения давления льда на образец бетона (стандартные отклонения ± 0,05 и ± 0,19 МПа для контактного давления 0,5 и 1,5 МПа соответственно).

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток (2009, 2015, 2019–2020)

В **2009** и **2015 гг.** проводились испытания бетона на сопротивление истирающему воздействию льда в Ледовой лаборатории, которая была представлена двумя рефрижераторными контейнерами: основным и вспомогательным [8, 18]. Основной контейнер разделен перегородками на три зоны: 1) приготовления модельного льда, 2) испытаний на абразию, 3) моторный отсек. В первой зоне располагались формы для заморозки льда с моделированием естественного процесса солености воды и температурных условий. Во второй – находилась установка для испытаний на абразию, а также подготовленные для эксперимента ледяные блоки. В третьей зоне располагались гидравлический мотор и масляная станция, а также контролирующая аппаратура. Вспомогательный контейнер исользовался для предварительного охлаждения воды, предназначенной для приготовления модельного льда.

В **2009 г.** А.Т. Беккер, П.В. Анохин и др. [8, 18] в ледовой лаборатории ДВФУ провели испытания образцов бетона различных составов, предназначенных для строительства основания гравитационного типа в рамках проекта «Сахалин 1» на месторождении Аркутун-Даги, для чего использовалась абразионная установка, основанная на кинематической схеме 1 (табл. 1) (рис. 10). Технические характеристики испытательного стенда приведены в табл. 2.

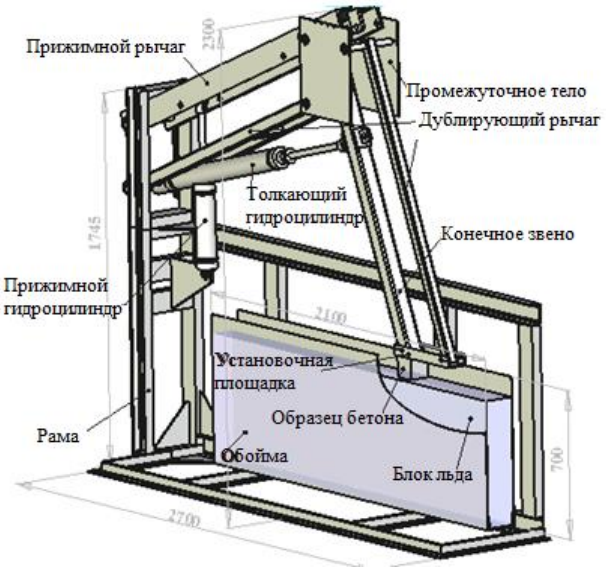


Рис. 10. Испытательный стенд Дальневосточного федерального университета, 2009 [8, 18]

Образец бетона постоянно прижат к поверхности блока льда и совершает возвратно-поступательные движения в горизонтальной плоскости. По мере изнашивания блока льда происходит постепенное перемещение траектории основного движения с сохранением ориентации образца и усилия его прижатия. В процессе абразии контролируются: температура воздуха, температура льда (двумя датчиками) и сила прижима (с помощью датчика силы).

Таблица 2

Технические характеристики испытательного стенда Дальневосточного федерального университета, 2009 и 2015 г.

Параметр	Величина
Амплитуда горизонтального перемещения	1500 мм
Амплитуда вертикального перемещения	700 мм
Скорость горизонтального перемещения (регулируемая)	0,2÷1,0 м/с
Скорость вертикального перемещения при позиционировании	1,0÷5,0 мм/с
Усилие прижима образца	1,0÷10,0 кН

В 2015 г. для проведения исследований данная установка была усовершенствована (рис. 11). Испытывались образцы бетона трех классов и два типа сталей [9].

В 2019 г. в Ледовой лаборатории МНОЦ «Арктика» ДВФУ разработан и апробирован новый испытательный стенд [3–5] (рис. 12), который по кинематическому устройству содержит признаки схем 1 (в части движения образца материала по поверхности льда) и 3, что обусловлено непрерывностью движения при истирании с сохранением на контакте условия параллельности истираемой грани образца материала и поверхности ледяного блока.

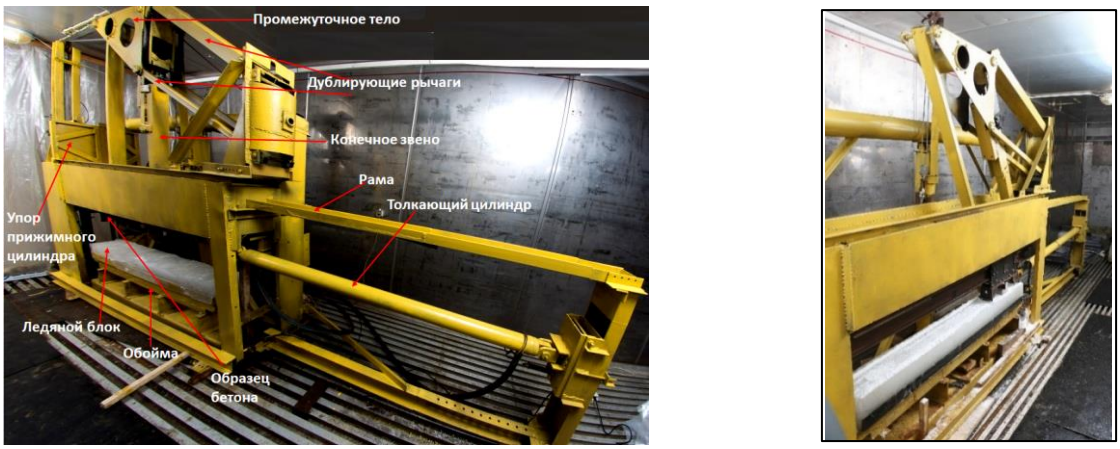


Рис. 11. Испытательный стенд Дальневосточного федерального университета, 2015 [9]

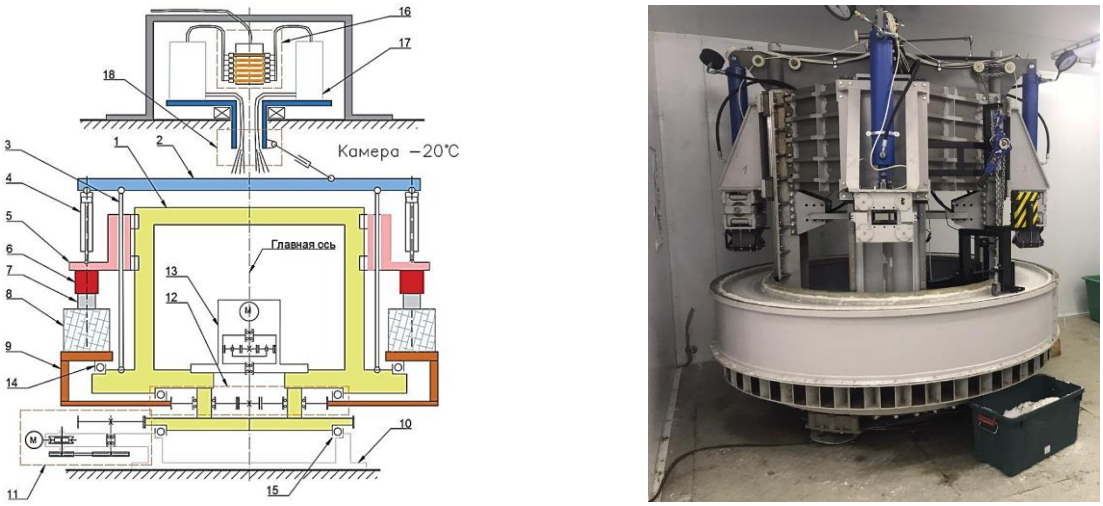


Рис. 12. Кинематическая схема и фотография испытательного стенда ДВФУ: 1 – рама, 2 – траверса, 3 – стержень, 4 – гидроцилиндр, 5 – каретка, 6 – датчик трения, 7 – образец, 8 – модельный лед, 9 – диск опорный, 10 – основание – фундамент, 11 – механизм поворота, 12 – центральный редуктор, 13 – главный мор-редуктор, 14 – главный опорный подшипник, 15 – поворотный подшипник, 16 – контактное вращающееся устройство, 17 – блок автоматики, 18 – узел ввода–вывода сигналов

Основные технические характеристики стенда приведены в табл. 3, а кинематическая схема и общий вид – на рис. 12.

Основные условия истирания достигаются в результате прижатия образца 7 к модельному льду 8 за счет усилий гидроцилиндра 4. Движение образца по льду выполняется за счет вращения диска 9 со льдом 8 относительно образца. По мере изнашивания льда образец перемещается вниз строго параллельно оси вращения диска со льдом. Перемещение образца выполняется совместно с кареткой 5, оснащённой линейными направляющими.

Таблица 3

Технические характеристики испытательного стенда Дальневосточного федерального университета, 2020

№	Наименование		Значение
1	Неизменные технические параметры	Усилие прижима образца, максимальное, Н	100×10^3
2		Усилие трения, максимальное, Н	30×10^3
3		Крутящий момент диска, не более, Н·м	30×10^3
4		Частота вращения диска, номинально, мин$^{-1}$	10
5		Рабочий ход механизма прижима, м	0,6
6		Диаметр диска расчетный, м	2
7		Толщина ледового материала, м	0,4
8		Размеры и форма образца, м	Куб 0,15×0,15×0,15
9		Допустимый износ образца, не более, м	0,003
10	Контролируемые условия эксперимента	Температура окружающего воздуха, °С	(-5…-20) ±1
11		Скорость движения, м/с	(0,001÷1) ±1%
12		Усилие прижима, Н	$(10\div100)\times10^3$ ±1%
13		Давление на контакте, Па	$(0,5\div5,5)\times10^6$ ±2%
14		Реверс направления	Возможен
15		Контроль пройденного пути образца	Возможен
16		Количество одновременно испытуемых образцов	1…4
17		Длительность непрерывного испытания	Не лимитируется

Анализ опыта разработки стендов и проведения испытаний материалов конструкций морских гидротехнических сооружений на сопротивление ледовой абразии

Анализ методов испытаний материалов на ледовую абразию и предшествующий опыт экспериментальных исследований выявил проблемы, ранее не учитываемые при организации подобных испытаний. На основании сделанных выводов улучшены технические характеристики исследовательского оборудования и усовершенствованы методические рекомендации проведения самих испытаний.

Большое внимание было уделено расширению диапазона скоростей скольжения образца материала по льду. Особую значимость представляет нижний предел скорости, при которой скольжение образца возможно без наложения вибраций. Процесс вибраций возникает в результате остановки образца из-за примерзания ко льду (в силу предельно низких скоростей взаимодействия) с последующим его срывом. Таким образом, исключить источник вибраций невозможно. Однако возможна стабилизация движения при малых скоростях как за счет быстродействия системы контроля движения (активные методы управления), так и за счет пассивных качеств оборудования, таких как конструктивная жесткость и инерционность привода.

Другой важный параметр испытания – это масштабный фактор эксперимента. За счет увеличения размера образца с 70 до 150 мм стало возможным проводить испытание бетона с более крупным заполнителем (до 40 мм), что имеет большое значение для практики. В связи с увеличением размеров образцов для обеспечения необходимых давлений на контакте со льдом потребовалось значительно увеличить прижимное усилие на образец.

В свою очередь производительность испытаний является важным экономическим критерием при большом количестве образцов и при значительной длительности испытаний. Конструктивное решение стенда ДВФУ позволяет одновременно испытывать до четырех образцов при разных контактных давлениях.

Для обеспечения необходимой длительности испытаний требуется иметь достаточную толщину блока льда: в стенде предусмотрена емкость для блока льда необходимого размера, при этом модельный лед в случае необходимости может быть многократно воспроизведен.

Контроль поверхности контакта образца со льдом достигается за счет применения специального ножа, который подрезает блок льда и формирует границы ледового буртика, размеры которого меньше размеров образца материала, так как обязательным условием взаимодействия образца материала со льдом является наличие свободной поверхности испытываемой грани образца. Такой подход обеспечивает необходимую точность измерения степени истирания образца.

Кроме обозначения границ подрезка нужна и для обеспечения высокой прочности ледового буртика. За счет небольшой высоты буртика (не более 3 мм) исключается его разрушение на краях, что приводит к снижению погрешностей результатов испытаний.

В ходе эксперимента могут возникать особые условия, приводящие к аварийным ситуациям в работе оборудования или снижающие достоверность исследования, а именно: образование наледи, появление механических примесей на поверхности блока льда, разогрев поверхности льда, образование снега в процессе подрезки блока льда. Для снижения возможного их влияния предусмотрены следующие мероприятия.

- Внешний подогрев образца материала – для предотвращения образования наледи. Образование наледи – процесс естественный, обусловленный конденсацией влаги на более холодной поверхности образца, при этом наледь служит защитным слоем, препятствующим непосредственному контакту образец–лед.

- Очистка поверхности льда от механических примесей – осколков образцов материала, оторвавшихся от острых граней. Для этого применяют вентилятор с высоким давлением воздушного потока.

- Охлаждение поверхности льда вентилятором, что улучшает условия эксперимента. Разогрев поверхности льда – это процесс, обусловленный некоторыми режимами истирания образцов, где часть энергии оборудования высокой мощности, затраченная на поддержание скорости движения, выделяется в виде тепла на поверхности льда. Нарушение баланса между отводом и подводом энергии приводит к разогреву льда и как следствие – к изменению условия эксперимента. Поэтому в этих режимах целесообразно ограничить число одновременно испытуемых образцов до двух.

- Удаление снега, образованного в процессе подрезки блока льда: для этого применяется вакуумный воздушный насос и уловитель циклонного типа.

Для достоверной оценки глубины ледовой абразии каждое испытание необходимо доводить до значимой (для измерений) глубины износа образца, что требует регламентации длины пути истирания для разного типа материалов (бетон, металл или покрытие).

Условия проведения испытаний по различным методикам приведены в табл. 4.

Оценка параметров испытаний в соответствии с табл. 4 показывает, что на сегодняшний момент нет единого понимания условий проведения экспериментов на сопротивление материалов ледовым истирающим воздействиям.

Учитывая опыт проведения экспериментальных исследований в Ледовой лаборатории ДВФУ, можно рекомендовать следующие условия проведения испытаний:

- температура льда может изменяться в диапазоне от –5 до –20 °С, а для проведения испытаний с постоянной температурой рекомендуется –10 °С;
- давление на контакте возможно изменять в диапазоне от 0,5 до 3,0 МПа;
- скорость взаимодействия следует изменять в диапазоне от 0,5 до 50 см/с, для проведения испытаний с постоянной скоростью рекомендуется 10 или 20 см/с;
- максимальный путь истирания для бетона – от 7 до 10 км, для металла – от 10 до 25 км;
- соленость льда может изменяться в диапазоне от 3 до 5‰.

Таблица 4

Условия проведения испытаний на ледовую абразию

Наименование	Япония			Норвегия	Россия	Канада	
	1981-1985 [20, 31]	1988-1997 [19–21]	2012, 2014 [25, 26]	2012, 2015, 2019 [13, 22, 27, 32, 33]	2009, 2015 [11, 12]	2001 [14]	2015 [28]
Кинематическая схема	Схема 2	Схема 1		Схема 2	Схема 1	Схема 2	Схема 3
Материал образца	Бетон / металл	Бетон	Металл	Бетон	Бетон / металл	Бетон / металл	Бетон
Температура льда, °С	от –1/ до –10	–5; –10; –20 ср. –10	–10	–5; –10; –20 ср. –10	–5; –10; –20 /–5; –10	–2; –4; –6; –11 /–2; –3	–12
Давление на контакте, МПа	Более 0,02/ более 1,0	0,5–3,0 шаг 0,5	От 0,01 до 1,62 ср. 0,6	0,5; 1,0; 1,5 ср. 1,0	0,5; 1,5; 2,5; 3,0/0,5; 1,5	0,65; 1,3/5,0	Нагрузка, Н, 369, 527, 626
Скорость взаимодействия, см/с	От 0,04 до 130	2, 5, 20	1÷15 ср. 6	10; 16; 20 ср. 10	20	1; 5; 10; 15, 45 / 10÷30	ср. 44,5
Максимальный путь истирания, км	–	7÷10 и более	От 50 до 125 ср. 50	1,35	7÷10 и более/35	4 прохода	10
Амплитуда горизонтального перемещения, см	30	30	30	30	70/150	90	Нет
Соленость льда, ‰	–	3,0; 5,0		Пресный	4,0	5,0	Пресный

Примечание. Прочерк (–) означает отсутствие данных.

Следует отметить, что амплитуда горизонтального перемещения определяется не условиями проведения эксперимента, а техническими характеристиками самой установки. В данном аспекте испытательный стенд ДВФУ имеет преимущества, так как обеспечена непрерывность движения образца по поверхности льда.

Заключение

Проведенный анализ показал, что несмотря на многочисленные исследования в области сопротивления материалов ледовой абразии, процессы, происходящие в зоне контакта «лед–сооруж ение», изучены недостаточно. В лабораториях условия взаимодействия реальных объектов со льдом с трудом поддаются моделированию, что обусловливается трудностью воспроизводства здесь естественных условий, а также масштабным эффектом. Поэтому в настоящее время пока нет нормативной методики и технических средств для обеспечения оценки степени сопротивления материалов ледовой абразии.

К таким условиям можно отнести физико-механические свойства льда, характер разрушения льда в зоне контакта с объектом, неоднородность свойств льда как природного материала, изменчивость бетонной поверхности по мере износа и ее влияние на интенсивность абразии, обледенение бетонной поверхности, влияние загрязненности ледяного покрова и т.п. Поэтому закономерности, полученные одной группой исследователей в лаборатории, могут существенно отличаться от других аналогичных результатов.

Кроме того, испытания проводятся на различных установках, имеющих разные кинематические схемы, различные размеры образцов и различные свойства модельного льда, при этом износ поверхности испытуемых образцов изменяется от нескольких микрон до нескольких миллиметров, что приводит к необходимости применения различных средств измерения

глубины ледовой абразии от микрометра часового типа до лазерного сканера. Поэтому в настоящее время пока нет нормативной методики и общепризнанных технических средств для обеспечения оценки степени сопротивления материалов ледовой абразии. Разработка такой методики и апробированных технических средств является актуальной научной проблемой.

Вклад авторов в статью: П.В. Анохин – разработка оборудования, организация и проведение экспериментальных исследований; А.Т. Беккер – постановка задач и программ исследований, разработка испытательных стендов, организация испытаний; Т.Э. Уварова – аналитический обзор литературных источников, анализ различных испытательных установок; Е.Е. Помников – планирование, организация и проведение испытаний.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 31384-2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2010.
2. ГОСТ Р 54483-2011 (ИСО 19900:2002). Нефтяная и газовая промышленность. Платформы морские для нефтегазодобычи. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2012.
3. Пат. 2542595 Российская Федерация, C1 Установка для исследования образца материала на истирание льдом / А.Т. Беккер, П.В. Анохин, Р.С. Тютрин; 2013146007/28, заявл. 15.10.2013; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5. 7 с.
4. Пат. Российская Федерация, 2542612, C1 Установка для исследования образца материала на истирание льдом / А.Т. Беккер, П.В. Анохин, Р.С. Тютрин; заявка: 2013146148/28, заявл.:15.10.2013; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5. 10 с.
5. Пат. Российская Федерация, 2542613, C1 Установка для исследования образца материала на истирание льдом / А.Т. Беккер, П.В. Анохин, Р.С. Тютрин, заявка: 2013146117/28, заявл. 15.10.2013; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5. 6 с.
6. СП 41.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87. М.: Минрегион России, 2012.
7. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. М.: Минрегион России, 2012. 41 с.
8. Уварова Т.Э. Истирающее воздействие дрейфующего ледяного покрова на морские гидротехнические сооружения: дис. … д-ра техн. наук. Владивосток, 2015.
9. Физическое моделирование воздействия льда на гидротехнические сооружения: отчет. Этап 3, раздел 3.2, стадия 3.2.2 по договору № 100015/02286Д от 14 апреля 2015 г.
10. Bekker A.T. Problem of the ice cover abrading action on legs of concrete offshore structures. WORKSHOP. Ice Abrasion on Concrete Structures. Helsingfors, October 25 and 26, 2007. The Nordic Concrete Federation, 2008.
11. Bekker A.T., Uvarova T.E., Pomnikov E.E., Farafonov A.E., Prytkov I.G., Tyutrin R.S. Experimental Study of Concrete Resistance to Ice Abrasion. Proc. of the 21th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. Maui, Hawaii, 2011, p. 1044–1047.
12. Bekker A.T., Uvarova T.E., Pomnikov E.E. Numerical simulation model of ice-structure interaction Proc. of the 23rd Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC-15). June 14–18, 2015.
13. Bøhn O.D. Ice abrasion of concrete, background theory and testing at the NTNU laboratory, Master thesis of Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Norway, 2012.
14. Frederking R., Barker A. Friction of sea ice on various construction materials. Ottawa, Ont. K1A 0R6, Canada, 2001.
15. Hara F. Saeki H., Sato M. et al. Prediction of the degree of abrasion of bridge piers by freshwater ice and the protective measures. Proc. of the Intern. Conf. on Concrete under Severe Conditions, CONSEC'95. Vol. 1. Sapporo, Japan, 1995, p. 485–494.

16. Hara F., Takahashi Y., Saeki H. Evaluation of test methods of abrasion by ice movements on the surface of reinforced concrete structures. Proc. of the Intern. Conf. on Concrete under Severe Conditions, CONSEC'95. Vol. 1, Sapporo, Japan, 1995, p. 475–484.
17. Huovinen S. Abrasion of concrete by ice in arctic sea structures. VTT Publications 62 (Doctoral thesis). Espoo, 1990,110 p.
18. Ice Abrasion Test Sakhalin-1 Arkutun-Dagi GBS. Project RUSD-HYY-J2-BR-37000.8888.01 – Vladivostok, 2009.
19. Itoh Y., Tanaka Y., Saeki H. Study on the Prediction Method of Abrasion Depth of Concrete Marine Structures due to Ice Movements. Proc. of Civil Engineering in the Ocean. 1988, vol. 7, p. 221–225.
20. Itoh Y., Tanaka Y., Saeki H. Estimation method for abrasion of concrete structures due to sea ice movement . Proc. of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, 2, 1994, p. 545–552.
21. Itoh Y., Tanaka Y., Delgado A. Abrasion depth of a cylindrical concrete structure due to sea ice movement . Int. J. Offshore Polar Eng. 1996;6(2):144–151.
22. Jacobsen S., Høiseth K., Bekker A. et al. Concrete Ice Abrasion due to Ice-indentation Pore Pressure. Proc. of the 1th International Congress on Durability of Concrete ICDC 2012. Trondheim, Norway, 2012.
23. Janson J.E. Long Term Resistance of Concrete Offshore Structures in Ice Environment. Proc. 7th Intern. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE). Houston, Texas, N.Y. American Society of Mechanical Engineers, 1988, vol. 3, p. 225–231.
24. Janson J.E. Report of field investigation of ice impact on lightweight aggregate concrete – results from the winter season 1986–1987. VBB, Stockholm, Sweden, 1987.
25. Kioka S., Takeuchi T. Tests on Wear of Various Metals due to Ice Friction. Civil Engineering Research Institute for Cold Region, Sapporo, Japan and Hachinohe Institute of Technology, Sapporo, Japan, 2012.
26. Kioka S., Takeuchi T. A Consideration of Abrasive Wear of Steel Structure caused by Friction of Sea Ice with interposed sand. Proc. of the 22th IAHR Symposium on Ice, Singapore, August 11 to 15, 2014, p. 364–371.
27. Moen E., Hoiseth K.V., Leira B., Hoyland K.V. Experimental study of concrete abrasion due to ice friction. Part 1: Set-up, ice abrasion vs. material properties and exposure conditions. Cold Regions Science and Technology, 110, 2015, p. 202–214.
28. Newhook J.P., McGuinn D.J. Ice Abrasion Assessment – Piers of Confederation Bridge. Confederation Bridge Engineering Summit. Charlottetown, PEI. Canada, 2007, August 19–22, p. 145–157.
29. Ryan A., Bruneau S., Colbourne B. Conceptual Design for Testing Ice Abrasion on Offshore Concrete Surfaces. Proc. of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conf. San Francisco, California, USA, 2017, p. 1292–1298.
30. Saeki H., Ono T., Nakazawa N., Sakai M., Tanaka S. The coefficient of friction between sea ice and various materials used in offshore structures. J. of Energy resources technology. 1986;108:65–70.
31. Saeki H., Onodera T., Tatsuta M., Ono T. Experimental Study-on Coefficient of Friction of Sea Ice, The Annual Meeting of Japan Society of Civil Engineers. Hokkaido Branch, Sapporo, Japan. Feb., 1981.
32. Shamsutdinova G., Max A.N. Hendriks, Jacobsen S. Concrete-Ice Abrasion Laboratory Experiments. Norway, Netherlands, 2017.
33. Shamsutdinova G., Hendriksa M., Jacobsena S. Topography studies of concrete abraded with ice. Wear. 2019;430–431(July 15):1–11. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.04.017

DOI: https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-12

Anokhin P., Bekker A., Uvarova T., Pomnikov E.

PAVEL ANOKHIN, Researcher, anokhin.pv@dvfu.ru,
ALEXANDER BEKKER, Doctor of Engineering Science, Professor,
ResearcherID: AAB-8482-2020, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2899-7995,
ScopusID: 35610298200, bekker.at@dvfu.ru
TATYANA UVAROVA, Doctor of Engineering Science, Professor (Corresponding Author),
SPIN: 6005-1621, ResearcherID: G-7681-2016, ORCID: orcid.org/0000-0002-9147-5145,
ScopusID: 7003267351, uvarova.tye@dvfu.ru
EGOR POMNIKOV, Candidate of Engineering Sciences, Professor,
pomnikov.ee@dvfu.ru
Polytechnic Institute, *Far Eastern Federal University*
Vladivostok, Russia

Methods of determination of the degree of concrete resistance to ice abrasion (review)

Abstract: Development of offshore hydrocarbon deposits in the Arctic and sub-Arctic seas requires due consideration for ice impacts on offshore hydraulic structures. Abrasion wear of ice protection and other structures from the abrasive effects of ice is a very important factor to be considered at their design phase. This process can cause surface deterioration and destruction of the construction material, particularly concrete, and can lead to the exposure of reinforcement, which is unacceptable from the point of safety of operation of such unique structures. The existing methods of designing concrete and reinforced concrete elements of the hydraulic structures disregard the parameters of concrete resistance to ice abrasion; therefore, it is necessary to conduct appropriate experiments on concrete-ice abrasion. This article provides an overview of methods for experimental determination of the depth of ice abrasion. The studies were carried out in different countries at different facilities with their own advantages and disadvantages. Based on the analysis of best world experience, the authors present a unique abrasive unit developed at the Far Eastern Federal University. Analysis of the data presented in the review shows the advantages of this installation and contributes to the development of a normative method for determining the resistance of building materials to ice abrasive effects.
Keywords: ice abrasion, concrete, offshore structure

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

REFERENCES

1. GOST 31384-2008. Protection of concrete and reinforced concrete structures from corrosion. General technical requirements. M., Standartinform, 2010.
2. GOST R 54483-2011 (ISO 19900: 2002). Oil and gas industry. Offshore platforms for oil and gas production. General requirements. M., Standartinform, 2012.
3. Pat. RU. N 2542595 C1 Installation for the study of a sample of material for ice abrasion. A.T. Becker, P.V. Anokhin, R.S. Tyutrin, application: 2013146007/28, 15.10.2013; publ. 02/20/2015. Bul. N 5, 7 p.
4. Pat. RU. N 2542612 C1 Installation for the study of a sample of material for abrasion with ice. A.T. Bekker, P.V. Anokhin, R.S. Tyutrin, application: 2013146148/28, 15.10.2013; publ. 02/20/2015, Bul. N. 5, 10 p.
5. Pat. RU. N 2542613, C1 Installation for the study of a sample of material for ice abrasion. A.T. Becker, P.V. Anokhin, R.S. Tyutrin, application: 2013146117/28, 15.10.2013; publ. 02/20/2015, Bul. N 5, 6 p.
6. SP 41.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures of hydraulic structures. Upd. edition of SNiP 2.06.08-87. M., 2012.
7. SP 58.13330.2012. Hydraulic structures. Basic provisions. Upd. edition of SNiP 33-01-2003. M., 2012, 41 p.
8. Uvarova T.E. Abrasive effect of drifting ice cover on offshore hydraulic structures: Dis. ... Dr. Tech. sciences. Vladivostok, 2015.

9. Physical modeling of ice impact on hydraulic structures: report. Stage 3, section 3.2, stage 3.2.2 under contract N 100015 / 02286D dated April 14, 2015.
10. Bekker A.T. Problem of the ice cover abrading action on legs of concrete offshore structures. WORKSHOP. Ice Abrasion on Concrete Structures. Helsingfors, October 25 and 26, 2007. The Nordic Concrete Federation, 2008.
11. Bekker A.T., Uvarova T.E., Pomnikov E.E., Farafonov A.E., Prytkov I.G., Tyutrin R.S. Experimental Study of Concrete Resistance to Ice Abrasion. Proc. of the 21th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. Maui, Hawaii, 2011, p. 1044–1047.
12. Bekker A.T., Uvarova T.E., Pomnikov E.E. Numerical simulation model of ice-structure interaction Proc. of the 23rd Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC-15). June 14–18, 2015.
13. Bøhn O.D. Ice abrasion of concrete, background theory and testing at the NTNU laboratory, Master thesis of Norwegian Univ. of Science and Technology. Trondheim, Norway, 2012.
14. Frederking R., Barker A. Friction of sea ice on various construction materials. Ottawa, Ont. K1A 0R6, 2001.
15. Hara F. Saeki H., Sato M. et al. Prediction of the degree of abrasion of bridge piers by freshwater ice and the protective measures. Proc. of the Intern. Conf. on Concrete under Severe Conditions, CONSEC'95. Vol. 1. Sapporo, Japan, 1995, p. 485–494.
16. Hara F., Takahashi Y., Saeki H. Evaluation of test methods of abrasion by ice movements on the surface of reinforced concrete structures. Proc. of the Intern. Conf. on Concrete under Severe Conditions, CONSEC'95. Vol. 1, Sapporo, Japan, 1995, p. 475–484.
17. Huovinen S. Abrasion of concrete by ice in arctic sea structures. VTT Publications 62 (Doctoral thesis). Espoo, 1990,110 p.
18. Ice Abrasion Test Sakhalin-1 Arkutun-Dagi GBS. Project RUSD-HYY-J2-BR-37000.8888.01 – Vladivostok, 2009.
19. Itoh Y., Tanaka Y., Saeki H. Study on the Prediction Method of Abrasion Depth of Concrete Marine Structures due to Ice Movements. Proc. of Civil Engineering in the Ocean. 1988, vol. 7, p. 221–225.
20. Itoh Y., Tanaka Y., Saeki H. Estimation method for abrasion of concrete structures due to sea ice movement . Proc. of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, 2, 1994, p. 545–552.
21. Itoh Y., Tanaka Y., Delgado A. Abrasion depth of a cylindrical concrete structure due to sea ice movement . Int. J. Offshore Polar Eng. 1996;6(2):144–151.
22. Jacobsen S., Høiseth K., Bekker A. et al. Concrete Ice Abrasion due to Ice-indentation Pore Pressure. Proc. of the 1th International Congress on Durability of Concrete ICDC 2012. Trondheim, Norway, 2012.
23. Janson J.E. Long Term Resistance of Concrete Offshore Structures in Ice Environment. Proc. 7th Intern. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE). Houston, Texas, N.Y. American Society of Mechanical Engineers, 1988, vol. 3, p. 225–231.
24. Janson J.E. Report of field investigation of ice impact on lightweight aggregate concrete – results from the winter season 1986–1987. VBB, Stockholm, Sweden, 1987.
25. Kioka S., Takeuchi T. Tests on Wear of Various Metals due to Ice Friction. Civil Engineering Research Institute for Cold Region, Sapporo, Japan and Hachinohe Institute of Technology, Sapporo, Japan, 2012.
26. Kioka S., Takeuchi T. A Consideration of Abrasive Wear of Steel Structure caused by Friction of Sea Ice with interposed sand. Proc. of the 22th IAHR Symp. on Ice, Singapore, August 11 to 15, 2014, p. 364–371.
27. Moen E., Hoiseth K.V., Leira B., Hoyland K.V. Experimental study of concrete abrasion due to ice friction. Part 1: Set-up, ice abrasion vs. material properties and exposure conditions. Cold Regions Science and Technology, 110, 2015, p. 202–214.
28. Newhook J.P., McGuinn D.J. Ice Abrasion Assessment – Piers of Confederation Bridge. Confederation Bridge Engineering Summit. Charlottetown, PEI. Canada, 2007, August 19–22, p. 145–157.
29. Ryan A., Bruneau S., Colbourne B. Conceptual Design for Testing Ice Abrasion on Offshore Concrete Surfaces. Proc. of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conf. San Francisco, California, USA, 2017, p. 1292–1298.
30. Saeki H., Ono T., Nakazawa N., Sakai M., Tanaka S. The coefficient of friction between sea ice and various materials used in offshore structures. J. of Energy Resources Technology. 1986;108:65–70.
31. Saeki H., Onodera T., Tatsuta M., Ono T. Experimental Study-on Coefficient of Friction of Sea Ice, The Annual Meeting of Japan Society of Civil Engineers. Hokkaido Branch, Sapporo, Japan. Feb., 1981.
32. Shamsutdinova G., Max A.N. Hendriks, Jacobsen S. Concrete-Ice Abrasion Laboratory Experiments. Norway, Netherlands, 2017.
33. Shamsutdinova G., Hendriksa M., Jacobsena S. Topography studies of concrete abraded with ice. Wear. 2019;430–431(July 15):1–11. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.04.017