

ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК 539.3; 001.891.573; 519.6

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-5(67-72)

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛЕДЯНЫХ БАЛОК В УСЛОВИЯХ ЧИСТОГО ИЗГИБА ПРИ УСИЛЕНИИ АРМИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В.М. Козин¹, А.С. Васильев², В.Л. Земляк², К.И. Ипатов²¹ Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН,
681005, Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1, Россия; vellkom@list.ru² Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема,
679015, Биробиджан, ул. Широкая, 70А, Россия; vasil-grunt@mail.ru, ipatov21@mail.ru

Представлены модельные эксперименты и численные расчеты несущей способности ледовых балок, разрушаемых под действием чистого изгиба при последовательном увеличении нагрузок. Серия экспериментов с данной схемой армирования (арматура А400, диаметром 6 мм) проведена на специальной экспериментальной установке. Результаты численного расчета в программном комплексе ANSYS сопоставлены с экспериментальными данными. Выполнены численные расчеты для этой схемы армирования с различными композиционными материалами в качестве армирующих элементов. Дана качественная и количественная оценка влияния различных материалов на несущую способность ледяного покрова. Получены оригинальные результаты.

Ледовая переправа, поверхностное армирование, композиционный материал, ледяная балка, модельный эксперимент, численные исследования

BEARING CAPACITY OF REINFORCED ICE BEAMS EXPOSED TO SIMPLE BENDING

V.M. Kozin¹, A.S. Vasilyev², V.L. Zemlyak², K.I. Ipatov²¹ Institute of Machining and Metallurgy, FEB RAS,
1, Metallurgov str., Komsomolsk-na-Amure, 681005, Russia; vellkom@list.ru² Sholom-Aleichem Priamursky State University,
70A, Shirokaya str., Birobidzhan, 679015, Russia; vasil-grunt@mail.ru, ipatov21@mail.ru

The bearing capacity of reinforced ice beams exposed to simple bending under successively increasing loading has been studied in a series of laboratory experiments and by numerical modeling. The model experiments are performed using a specially designed installation, with A400 steel reinforcement, 6 mm in diameter. The simulation is run in the ANSYS software for reinforcement with different composite materials in order to assess their efficiency qualitatively and quantitatively. The original results have been obtained.

Ice crossing, surface reinforcement, composite material, ice beam, model experiment, numerical experiment

ВВЕДЕНИЕ

По мере дальнейшего развития гидротехнического и транспортного строительства при освоении Арктического шельфа, в Сибири и на Дальнем Востоке все большие объемы работ приходится выполнять в зимнее время, на льду рек и водохранилищ [Бычковский, Гурьянов, 2005]. Использование ледяного покрова в качестве ледовых переправ и грузонесущих платформ в суровых климатических условиях имеет большое значение, особенно для мест, где транспортная инфраструктура практически отсутствует. Изучение поведения льда под нагрузкой и применение моделей и общих принципов механики деформируемого

твердого тела к расчету его несущей способности началось относительно недавно и вызвано увеличением веса перевозимого груза.

Нормативными документами рекомендуются три основных метода повышения несущей способности ледяного покрова: намораживание дополнительных слоев льда сверху (посредством полива водой); снизу (при помощи наклонных термосифонов); устройство деревянных настилов [ОДН 218.010-98, 1998]. Однако традиционные методы ненадежны и сильно зависят от различных внешних факторов (наличия снега и ветра в момент намораживания, температуры окружающей среды и

др.). Поэтому возникает необходимость в совершенствовании методов повышения несущей способности путем армирования льда различными материалами.

В работах В.В. Якименко и В.В. Сиротюк [2014, 2015; Сиротюк и др., 2016] выполнен анализ существующих способов армирования льда, составлена классификация способов увеличения несущей способности и рекомендованы наиболее эффективные и экономически целесообразные способы усиления ледовых переправ, описаны экспериментальные исследования по “верхнему армированию” геосинтетическими материалами. В работе П.Е. Никитина, М.П. Никитиной [Способ..., 2015] представлен метод вмораживания стальных сеток в ледяной покров. В.М. Бузником [Buznik et al., 2017; Cherepanin et al., 2018] рассмотрены физико-механические свойства композитных материалов, полученных путем вмораживания в лед различных модификаторов (хвоя, углеродных нанотрубки, льноволокно, древесная стружка, стекловолокно и др.). Анализ полученных результатов показывает, что описанные методы дают прирост прочности при изгибе льда не более 75 %. Известен ряд решений, в которых для увеличения несущей способности в ледяной покров вмораживаются стальные элементы [Ледяная переправа, 2005; Способ..., 2016]. Достаточно перспективным может оказаться способ повышения несущей способности путем поверхностного армирования ледяного покрова за счет внедрения объемных армирующих каркасов в относительно тонкий лед толщиной 0.3–0.4 м. Ранее авторами установлено, что наличие цельносварных армирующих каркасов с поперечными связями приводит к увеличению прочности при изгибе до 86 % [Kozin et al., 2018a]. В случае расположения в верхней и нижней плоскости каркаса дополнительных продольных элементов прочность возрастает до 230 % [Kozin et al., 2018b]. Известно, что наличие дополнительных продольных связей в боковой поверхности армирующего каркаса ограничивает раскрытие трещин по высоте сечения образца.

В работе выполнено экспериментальное и численное исследование несущей способности в условиях чистого изгиба ледяных балок, усиленных объемным цельносварным армирующим каркасом из стальной арматуры периодического профиля с дополнительными продольными связями в боковых плоскостях. С целью проверки работоспособности предложенной численной модели выполнено моделирование для определения прочности образцов, усиленных каркасами из различных композиционных материалов (стеклопластиковая композитная арматура, углеродная арматура, арамидокомпозитная арматура, арматура комбинированная из стекла и базальта).

ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Прочностные и упругие характеристики льда определяются разными методами: 1) по изгибу балок, свободно лежащих на двух опорах; 2) по разрушению консолей (клавишей) на плаву; 3) по разрушению круглой, свободно лежащей на кольцевой опоре, ледяной пластины, нагружаемой в центре и др. [Войтковский, 1960]. В 1980 г. секцией ледовых проблем Международной ассоциации гидравлических исследований (МАГИ) дан ряд рекомендаций по проведению испытаний, учитывающих особенности льда как материала. Предложено при испытаниях задавать некоторые оптимальные соотношения между размерами испытываемого образца. Во многих работах установлено, что наилучшие результаты, позволяющие снизить масштабный эффект, т. е. влияние геометрических размеров образцов на прочностные свойства льда, получаются, когда ширина B и высота H балки равны, а длина L примерно равна $(8-8.5)H$ [Ледяная переправа, 2005] ($L = 10H$ в работе [Maattanen, 1976]). В рекомендациях МАГИ также указываются близкие величины: $B = (1-2)H$, $L = (7-10)H$.

В рамках настоящего исследования для определения упругих характеристик ледяных образцов наиболее целесообразным оказался метод изгиба балок, свободно лежащих на двух опорах.

Для выполнения модельных экспериментов была спроектирована и собрана универсальная нагружающая установка (рис. 1), которая состояла из силовой рамы (из стоек, станин, верхней и нижней балок), нагружающего устройства и измерительного модуля.

Нагружающее устройство состояло из гидроцилиндра 3 с номинальным давлением 9 атм и распределительной силовой балки 2. Усилие нагружающего устройства передавалось на образец 1 через шарнирные опоры 6. Нагружающая система устроена таким образом, чтобы обеспечивала в средней части пролета ледяного образца чистый изгиб. Вертикальные перемещения сечения образца в середине пролета измерялись с помощью бесконтактного лазерного датчика 5 (с точностью измерения до 0.01 мм) LAS-Z компании Way Con (Германия), закрепленного на независимой стойке. Нагрузка, которую испытывал образец, фиксировалась с помощью тензодатчика веса 4 LPA-22t с весовым терминалом SH-20 компании ТОКВЕС (Россия). Прочность образцов определялась при воздействии кратковременной нагрузки. Скорость нагружения была постоянной и составляла 135 кПа/с, время от начала нагружения до полного разрушения образца 5 с. Размер прокладки, передающей нагрузку на образец 200 × 200 мм, что соответствовало размеру поперечного сечения балки.

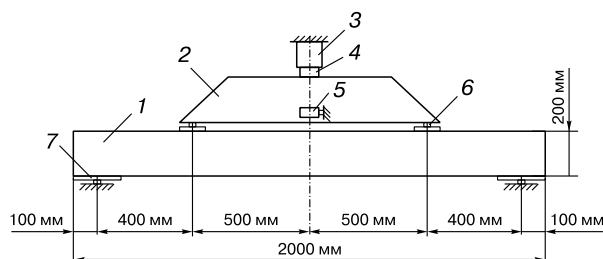


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 – ледяная балка; 2 – распределительная балка; 3 – гидроцилиндр; 4 – тензодатчик веса LPA-22t с весовым терминалом SH-20; 5 – датчик вертикальных перемещений LAS-Z; 6 – шарнирные опоры распределительной балки; 7 – шарнирные опоры ледяной балки.

Для приготовления ледяных образцов размерами $L \times B \times H = 2000 \times 200 \times 200$ мм была изготовлена деревянная опалубка из досок толщиной 40 мм. В опалубку укладывали двухслойную полиэтиленовую пленку толщиной 0.03 мм и закрепляли армирующий каркас, что обеспечивало его плоскопараллельное нахождение в толще балки, исключая выход арматуры на поверхность. Опалубку заливали водой. Жидкость подвергалась воздействию низких отрицательных температур до полного замерзания. В зависимости от погодных условий время приготовления образцов из пресноводного льда составляло от 5 до 7 сут при температуре окружающей среды от -15 до -28 °С. Было проведено три серии экспериментов. Для каждой приготавливалось одновременно 5 образцов при одинаковых условиях. Разрушающая нагрузка прикладывалась вдоль направления намерзания кристаллов. Данные экспериментов осреднялись, разница между результатами не превышала 15 %.

Для армирования ледяных балок использовался цельносварной армирующий каркас из стальной арматуры А400, периодического профиля, диаметром 6 мм (рис. 2).

Для оценки влияния поверхностного усиления растянутой и сжатой зон на несущую способ-

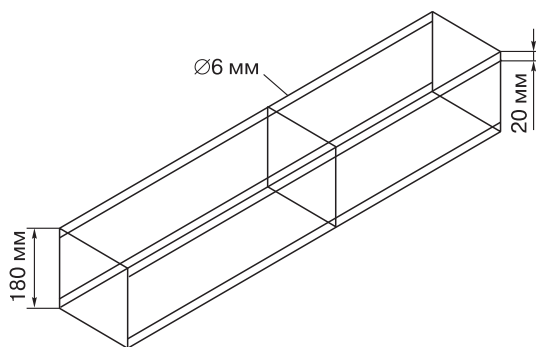


Рис. 2. Схема армирования ледяной балки.



Рис. 3. Появление трещин в ледяной балке.

ность льда в условиях чистого изгиба были проведены эксперименты по разрушению ледяных балок (рис. 3).

ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Численная модель состоит из 80 160 конечных элементов (КЭ) и 89 150 узлов. Конечный элемент для льда SOLID 65 реализует расчетную модель Виллама–Варнке [Willam, Warnke, 1974], применяемую для хрупких, структурно-неоднородных материалов. Данная модель допускает образование трещин по площадке, нормальной к действующим главным напряжениям, при превышении ими заданного предела прочности при растяжении, а также учитывает объемное напряженное состояние.

Для моделирования работы армирующих материалов применялся конечный элемент BEAM188 – балочный элемент с изгибной жесткостью. Каждый продольный стержень каркаса разбивался на 200 балочных КЭ, каждый поперечный стержень – на 18 КЭ. Основными параметрами конечного элемента BEAM188 являются: модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести (прочности) армирующего материала, тангенциальный модуль. Связь между КЭ льда и армирующих элементов принята идеальной. Для расчета усиленной ледяной балки использовались следующие механические характеристики льда: начальный модуль упругости $E = 300$ МПа, прочность при одноосном сжатии $R_{bc} = 0.6$ МПа, прочность при одноосном растяжении $R_{bt} = 0.5$ МПа, плотность $\rho = 930$ кг/м³, коэффициент Пуассона $\mu = 0.3$. Характеристики арматуры: начальный модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, расчетное сопротивление $R_s = 355$ МПа.

Механические характеристики материалов, используемых для усиления льда в численных экспериментах, приведены в таблице: горячекатаная арматура А400 (образец № 1); стеклопласти-

**Расчетные механические характеристики
стальной и композитной арматуры**

Показатель	Образец				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Предел прочности при растяжении $\sigma_{bt,n}$, МПа	365	168	840	448	320
Предел прочности при сжатии $\sigma_{bc,n}$, МПа	365	63	180	96	96
Модуль упругости E , МПа	$20 \cdot 10^4$	$50 \cdot 10^3$	$130 \cdot 10^3$	$70 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$

ковая композитная арматура (образец № 2); углеродная арматура (образец № 3); арамидокомпозитная арматура (образец № 4); арматура комбинированная из стекла и базальта (образец № 5).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования физико-механических свойств и оценки влияния поверхностного армирования на предельную несущую способность образцов была проведена предварительная серия экспериментов по нагружению неармированных ледовых балок. В ходе экспериментов определялась величина прогиба балки от нагрузки, подаваемой на испытуемый образец. Разрушающая нагрузка по данным модельных экспериментов составила 3.6 кН, в численном расчете около 3.9 кН [Kozin et al., 2018a].

На рис. 4 представлены результаты модельных испытаний армированных образцов в сопоставлении с численными расчетами. Видно, что максимальная разрушающая нагрузка составила 10.6 кН и существенно превысила предельную на-

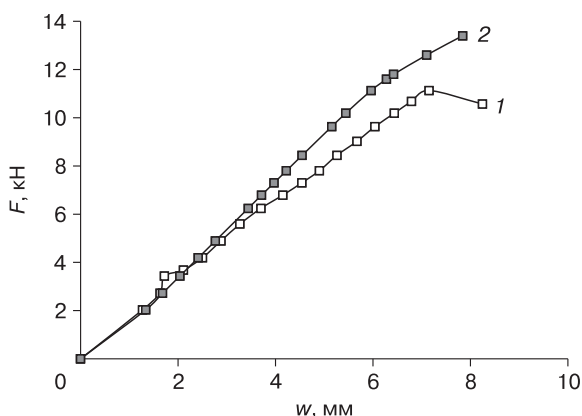


Рис. 4. Зависимость прогиба w армированного образца (A400) от нагрузки F .

1 – экспериментальные результаты; 2 – результаты численных исследований в ANSYS Workbench 17.2.

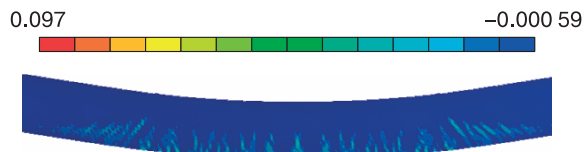


Рис. 5. Схема трещин при разрушении образца № 2.

На шкале – безразмерные величины деформаций согласно критерию трещинообразования.

грузку для неармированных балок [Kozin et al., 2018b]. При этом образовались сквозные трещины в испытуемых образцах, а максимальное значение прогиба составило 8.25 мм, после чего происходило разрушение балок.

Результаты модельных экспериментов и численных расчетов хорошо согласуются в упругой зоне. В качестве критерия разрушения ледяной балки был принят резкий рост деформаций, характеризующийся потерей несущей способности и разрушением большей части сечения. При этом арматура не достигала предела текучести, а разрушение происходило с образованием обширных сквозных трещин во льду в результате действия изгибающего момента в середине пролета балки.

Пример расчета напряженно-деформированного состояния армированного образца с арматурой A400 в программном комплексе ANSYS Workbench 17.2. показан на рис. 4.

Схема трещин в соответствии с деформационным критерием Базанта [Bazant, Cedolin, 1980] для диапазона значений деформаций от $-0.000 59$ до 0.097 приведена на рис. 5. Значения критерия больше нуля соответствуют возникновению и раскрытию трещин в растянутой зоне балки. В этот момент конечные элементы в составе дискретной

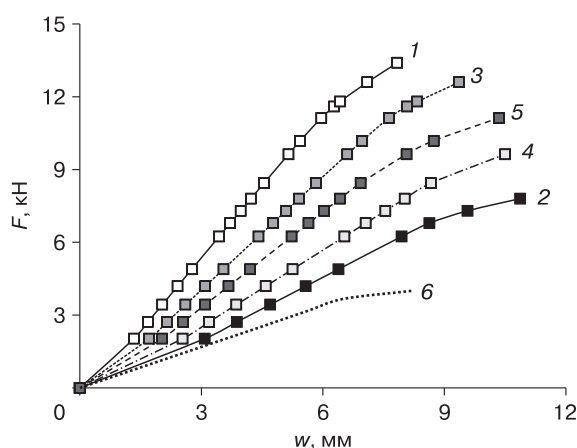


Рис. 6. Расчетная зависимость прогиба w от нагрузки F для армированных образцов № 1–5 (линии 1–5) и неармированного образца (линия 6).

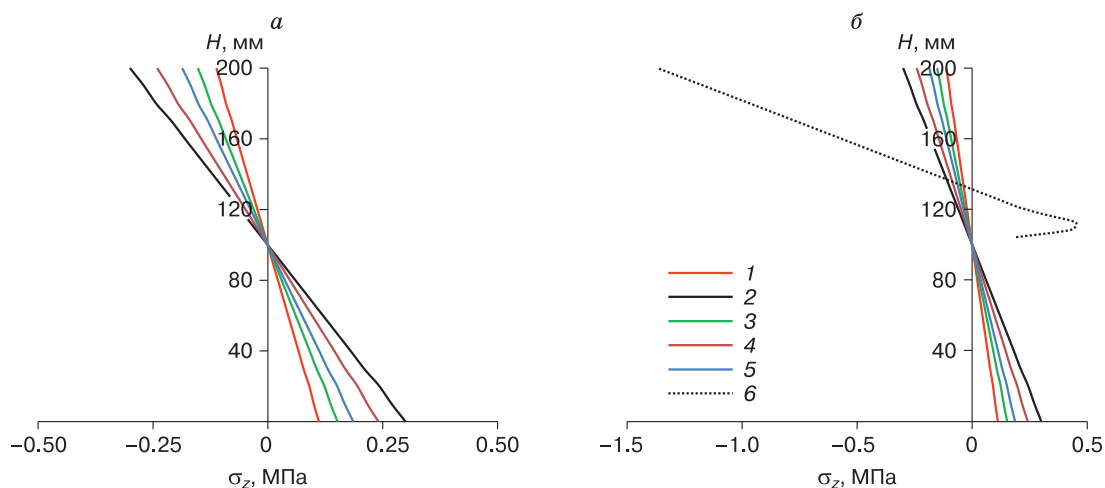


Рис. 7. Распределение нормальных напряжений σ_z во льду по высоте сечения балки при нагрузке $E = 3.6$ кН для армированных образцов № 1–5 (линии 1–5):

a – без неармированного образца; *б* – величины напряжений по отношению к напряжениям неармированного образца (линия 6).

модели теряют свою жесткость. При этом напряжения в арматуре растянутой зоны не достигли предела текучести и составили максимально 81.5 МПа в растянутой зоне ледяной балки.

Основные результаты численных расчетов приведены на рис. 6, где даны зависимости нагрузки от прогиба для образцов, армированных различными материалами.

Анализ данных показывает, что использование армирующих каркасов из различных композитных материалов приводит к существенному увеличению несущей способности льда. Образец № 1, армированный стальной арматурой А400, имеет наибольшую несущую способность. Наименьшей несущей способностью обладали образцы № 2 и 4. При этом наибольшую пластичность показал образец, армированный комбинированным сочетанием стекла и базальта (образец № 5).

Распределения напряжений в срединных сечениях каждого из армированных образцов при нагрузке 3.6 кН приведены на рис. 7. На рис. 7, *б* виден резкий скачок напряжений неармированного образца в верхней части сечения при отсутствии в нижней части, что свидетельствует о потере несущей способности неармированного образца.

Максимальные напряжения при нагрузке 3.6 кН для армированных образцов № 1–5 составили -0.11 , -0.30 , -0.15 , -0.24 , -0.18 МПа соответственно. Быстрее всего нормальные напряжения возрастали в образце № 2, усиленном стеклопластиковой композитной арматурой. Самый медленный рост напряжений наблюдался в образце № 1, усиленном арматурой А400, показавшем наибольшую несущую способность (см. рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты модельных экспериментов и численных расчетов хорошо согласуются в упругой зоне. Для образцов, усиленных каркасами из стальной арматуры А400, отклонения при сопоставлении экспериментальных и расчетных данных не превышают 5 % для максимальных прогибов и 26 % для разрушающей нагрузки.

2. Дана качественная и количественная оценка эффективности применения армирующих материалов, внедряемых в структуру льда с целью увеличения его несущей способности. Установлено, что использование объемных армирующих каркасов из различных материалов при заданной схеме армирования позволяет увеличить несущую способность от 116 % при усилении стеклопластиковой арматурой до 272 % при использовании стальной арматуры А400.

3. Разрушение образцов во всех случаях происходит в результате образования обширных сквозных трещин во льду, в результате действия изгибающего момента в середине пролета балки. Арматура при этом не достигала предела текучести.

Работа выполнена в рамках проекта 9.4934.2017/БЧ “Определение влияния ледовых условий на несущую способность ледяного покрова при использовании его в качестве ледовых переправ” задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности.

Литература

Бычковский Н.Н. Ледовые строительные площадки, дороги и переправы / Н.Н. Бычковский, Ю.А. Гурьянов. Саратов, Саратов. гос. техн. ун-т, 2005, 180 с.

Войтковский К.Ф. Механические свойства льда. М., Изд-во АН СССР, 1960, 99 с.

Ледяная переправа: пат. RU 2260648. Российская Федерация / Костенко А.В., Сердечный А.С., Сердечный А.А.; опубл. 20.09.2005.

ОДН 218.010-98. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ: введ. 01.10.1998; утвержд. ФДС России от 1998-08-26. М., Союздорнии Госстроя РФ, 1998, 77 с.

Сиротюк В.В., Якименко О.В., Левашов Г.М., Захаренко А.А. Опыт армирования ледового покрова на переправах с помощью геосинтетических материалов // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 3, с. 86–94.

Способ создания армированной ледовой переправы для широких водоемов: пат. RU 2569694. Российская Федерация / Никитин П.Е., Никитина М.П.; опубл. 27.11.2015.

Способ увеличения несущей способности ледяного покрова: пат. RU 2622967. Российская Федерация: МПК E01D 15.14 / Козин В.М., Земляк В.Л., Погорелова А.В., Матюшина А.А., Рогожникова Е.Г., Канделя М.В., Баурин Н.О., Николаев С.В. Патентообладатель Ин-т машиноведения и металлургии ДВО РАН, ПГУ им. Шолом-Алейхема, Амурский гуманитар.-педагог. гос. ун-т. – № 2016115943; опубл. 22.04.2016.

Якименко О.В. Усиление ледовых переправ геосинтетическими материалами / О.В. Якименко, В.В. Сиротюк. Омск, СибАДИ, 2015, 168 с.

Якименко О.В., Сиротюк В.В. Армирование ледовых переправ // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 1, с. 88–91.

Bazant Z.P., Cedolin L. Fracture mechanics of reinforced concrete // J. Eng. Mechanics, ASCE, 1980, p. 1287–1306.

Buznik V.M., Landik D.N., Erasov V.S. et al. Physical and mechanical properties of composite materials on the basis of an ice matrix // Inorganic Materials: Appl. Res., 2017, vol. 8, No. 4, p. 618–625.

Cherepanin R.N., Nuzhnyi G.A., Razomasov N.A. et al. Physicomechanical properties of glacial composite materials reinforced by Ruser-S Fibers. // Inorganic Materials: Appl. Res., 2018, vol. 9, No. 1, p. 114–120, DOI: 10.1134/S2075113318010082.

Kozin V.M., Zemlyak V.L., Vasilyev A.S., Ipatov K.I. The research of the stressed strain state of ice beams reinforced by surface reinforcement // ISOPE Conference, Symposium and Journal (Sapporo, June 10–15, 2018), Sapporo, Japan, 2018a, p. 1511–1515.

Kozin V.M., Zemlyak V.L., Vasilyev A.S., Ipatov K.I. Experimental and numerical research of the stressed-deformed state of ice beams reinforced by surface reinforcement // IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci., 2018b, vol. 193, 012031, DOI: 10.1088/1755-1315/193/1/012031.

Maattanen M. On the flexural strength of brackish water ice by in situ tests // Mar/Sci/Comuns, 1976, No. 2, p. 125–138.

Willam K.J., Warnke E.P. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete // Seminar of Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses. Istituto di Sperimentali Modeli e Strutture, Bergamo, Italy, May, 1974, p. 3–11.

References

Bychkovsky N.N., Guryanov Yu.A. Ledovye stroitel'nye ploshchadki, dorogi i perepravy [Ice Construction Sites, Roads and Crossing]. Saratov, Saratov State Technical University, 2005, 180 p. (in Russian).

Voitkovskiy K.F. Mekhanicheskie svoystva l'da [Mechanical Properties of Ice]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1960, 99 p. (in Russian).

Patent RU 2260648. Ledyanaya pereprava [Ice Crossing]. Kostenko A.V., Serdecnyi A.S., Serdecny A.A.; published 20.09.2005.

Common house needs. Working document ODN 218.010-1998. Guidelines to the design, construction and operation of ice crossings: issued to 01.10.1998; approved by the Federal Road Service of Russia in 1998-08-26. Moscow, Soyuzdornii Gosstroy RF. 1998, 77 p.

Sirotyuk V.V., Yakimenko O.V., Levashov G.M., Zakharenko A.A. Reinforcement of ice cover with geosynthetic materials. Earth's Cryosphere, 2016, vol. XX, No. 3, p. 79–86.

Patent RU 2569694. Sposob sozdaniya armirovannoy ledovoy perepravy dlya shirokikh vodoyemov [A method for creating reinforced ice crossing for large water bodies]. Nikitin P.E., Nikitina M.P.; published on 27.11.2015.

Patent RU 2622967. Sposob uvelicheniya nesushchey sposobnosti ledyanogo pokrova [A method for increasing ice bearing capacity]. Kozin V.M., Zemlyak V.L., Pogorelova A.V., Matyushina A.A., Rogozhnikova Ye.G., Kandelya M.V., Baurin N.O., Nikolayev S.V. Russian Federation: МПК E01D 15.14. Patent Holder Sholom-Aleykhem Institute of Machine Science and Metallurgy, Amur Humanitarian Pedagogical State University. No. 2016115943; published on 22.04.2016.

Yakimenko O.V., Sirotyuk V.V. Usilenie ledovykh pereprav geosinteticheskimi materialami [Reinforcement of Ice Crossings by Geosynthetic Materials]. Omsk, SibADI, 2015, 168 p. (in Russian).

Yakimenko O.V., Sirotyuk V.V. Reinforcement of ice crossings. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2014, vol. XVIII, No. 1, p. 88–91.

Bazant Z.P., Cedolin L. Fracture mechanics of reinforced concrete. J. Eng. Mechanics, ASCE, 1980, p. 1287–1306.

Buznik V.M., Landik D.N., Erasov V.S. et al. Physical and mechanical properties of composite materials on the basis of an ice matrix. Inorganic Materials: Appl. Res., 2017, vol. 8, No. 4, p. 618–625.

Cherepanin R.N., Nuzhnyi G.A., Razomasov N.A. et al. Physicomechanical properties of glacial composite materials reinforced by Ruser-S Fibers. Inorganic Materials: Appl. Res., 2018, vol. 9, No. 1, p. 114–120, DOI: 10.1134/S2075113318010082.

Kozin V.M., Zemlyak V.L., Vasilyev A.S., Ipatov K.I. The research of the stressed strain state of ice beams reinforced by surface reinforcement. In: ISOPE Conference, Symposium and Journal (Sapporo, June 10–15, 2018), Sapporo, Japan, 2018a, p. 1511–1515.

Kozin V.M., Zemlyak V.L., Vasilyev A.S., Ipatov K.I. Experimental and numerical research of the stressed-deformed state of ice beams reinforced by surface reinforcement. IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci., 2018b, vol. 193, 012031, DOI: 10.1088/1755-1315/193/1/012031.

Maattanen M. On the flexural strength of brackish water ice by in situ tests. Mar/Sci/Comuns, 1976, No. 2, p. 125–138.

Willam K.J., Warnke E.P. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. Seminar of Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses. Istituto di Sperimentali Modeli e Strutture, Bergamo, Italy, May, 1974, p. 3–11.

Поступила в редакцию 8 июня 2018 г., после доработки – 28 февраля 2019 г., принята к публикации 5 марта 2019 г.