

УДК 539.3; 001.891.573; 519.6
DOI 10.17223/19988621/61/6

В.М. Козин, А.С. Васильев, В.Л. Земляк, К.И. Ипатов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В УСЛОВИЯХ ЧИСТОГО ИЗГИБА ПРИ УСИЛЕНИИ АРМИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ¹

Исследовано влияние поверхностного армирования на несущую способность ледяного покрова. Представлены результаты эксперимента по исследованию разрушения ледовых балок с заданной схемой армирования и выполнено сопоставление полученных результатов с численными расчетами. Приведены численные исследования армированных ледовых балок, усиленных различными композиционными материалами. Численные расчеты выполнены в программном комплексе ANSYS. Результаты оригинальные.

Ключевые слова: *ледовая балка, поверхностное армирование, нагрузка, чистый изгиб, несущая способность, численное исследование, критерий прочности.*

Ледовые переправы на автомобильных дорогах организуются в зимний период времени при образовании на водных преградах ледяного покрова требуемой толщины, в случаях отсутствия мостовых сооружений, а также при невозможности устройства паромных переправ. Как отмечается в монографии Н.Н. Бычковского и Ю.А. Гурьянова [1], ледяной покров должен обладать достаточной несущей способностью (грузоподъемностью), а глубина воды подо льдом на переправе в течение всего периода ее работы должна быть не менее 1 м при самом низком уровне воды и наибольшей толщине льда. Стоит отметить трудности прогнозирования поведения льда при различных видах нагружения (статическом и динамическом). Разрушения льда от нормальных, наклонных и радиальных трещин исследовали в своих работах W.J. Lu, R. Lubbad, S. Loset [2]; С.Е. Renshaw, Е.М. Schulson, S.J.G. Sigward [3]; J.D. Tippmann, Н. Kim, J.D. Rhymer [4].

Если толщина ледяного покрова не достаточна для безопасной эксплуатации переправы, могут быть использованы традиционные методы повышения несущей способности льда, такие, как намораживание льда снизу, намораживание льда сверху или усиление льда деревянным копейным настилом [5]. Однако, как показывает практический опыт, физико-механические свойства ледяного покрова могут сильно зависеть от наличия снега и ветра в момент намораживания, температуры окружающей среды и других факторов. С учетом ненадежности физико-механических свойств льда из-за вышеперечисленных факторов актуальной становится задача повышения несущей способности льда альтернативными методами, например внедрением в лед армирующих элементов из различных материалов.

Внедрению усиливающих элементов в ледовые переправы посвящено множество работ. Достаточно перспективным является армирование ледовых переправ гео-

¹ 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 в рамках базовой части государственного задания вузу.

синтетическими материалами. Результаты экспериментальных исследований такого армирования представлены в работе Якименко [6–8]. П.Е. Никитин [9] предлагает способ создания ледовой переправы для широких водоемов путем вмораживания стальных сеток. Известен ряд решений, в которых для увеличения несущей способности в ледяной покров вмораживаются стальные элементы [10–13]. Внедрение в тонкий ледяной покров стальных цельносварных каркасов толщиной 0.3–0.4 м – достаточно перспективный метод усиления ледовых переправ.

Цель работы – выяснить, как ведет себя лед на переправах в условиях чистого изгиба. Для этого были выполнены модельные эксперименты армированных образцов, сопоставленные с численными расчетами в ПК ANSYS. В работе исследовались зависимости нагрузка – прогиб, а также напряженно-деформированное состояние ледовых образцов, усиленных поверхностными армирующими каркасами из различных материалов и с заданной схемой армирования.

Методика проведения экспериментальных и численных исследований

Для выполнения модельных экспериментов была спроектирована и собрана универсальная нагружающая установка (рис. 1), которая состояла из силовой рамы, состоящей из стоек, станин, верхней и нижней балок, нагружающего устройства и измерительного модуля. Нагружающее устройство представляло собой гидроцилиндр 3 с номинальным давлением 9 атм и распределительную силовую балку 2. Усилие нагружающего устройства передавалось на образец 1 через шарнирные опоры 6. Нагружающая система была устроена так, что обеспечивала в средней части пролета ледяного образца чистый изгиб. Вертикальные перемещения сечения образца в середине пролета измерялись с помощью бесконтактного лазерного датчика LAS-Z компании «Way Con» (Германия) 5, закреплённого на

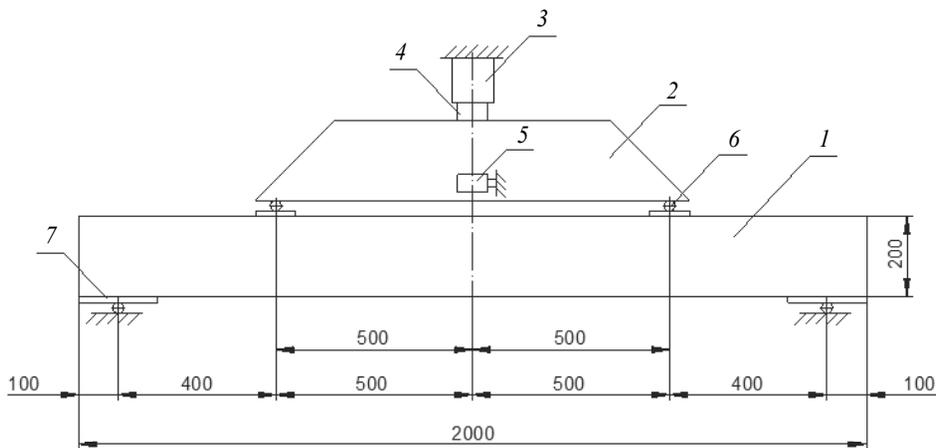


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – ледяная балка; 2 – распределительная балка; 3 – гидроцилиндр; 4 – весовой терминал SH-20; 5 – датчик вертикальных перемещений LAS-Z; 6 – шарнирные опоры распределительной балки; 7 – шарнирные опоры ледяной балки

Fig. 1. Diagram of the experimental setup: 1, ice beam; 2, distributing beam; 3, hydraulic cylinder; 4, weighing indicator SH-20; 5, vertical displacement sensor LAS-Z; 6, hinged supports of the distributing beam; and 7, hinged supports of the ice beam

независимой стойке. Нагрузка, которую испытывал образец, фиксировалась с помощью весового электронного терминала SH-20 компании ТОКВЕС (Россия) 4. Скорость нагружения для всех образцов была постоянной и составила 135 кПа/с.

Для приготовления ледяных образцов была изготовлена деревянная опалубка из досок толщиной 40 мм. Опалубка позволяла приготавливать ледяные балки размерами $L \times B \times H = 2000 \times 200 \times 200$ мм. В собранную опалубку укладывалась двухслойная полиэтиленовая плёнка толщиной 0.03 мм и армирующий каркас. После этого опалубка заливалась водой. Жидкость подвергалась воздействию низких атмосферных температур ($t < 0$ °C) до её полного замерзания. Время приготовления образца в зависимости от погодных условий составляло от 5 до 7 сут при температуре окружающей среды от -16 до -28 °C. Структура льда преимущественно сплошная, кристаллическая.

Для армирования ледяных балок использовался цельносварной каркас из стальной арматуры периодического профиля диаметром 6 мм. Схема каркаса представлена на рис. 2.

Эксперименты на ледяных балках проводились с целью оценки влияния поверхностного усиления растянутой зоны армирующим каркасом на их (балок) несущую способность в условиях чистого изгиба.

Численный расчет напряженно-деформированного состояния ледяных образцов выполнялся в программном комплексе ANSYS Workbench v15, с использованием модуля ANSYS Mechanical. Для льда использовались нелинейные конечные элементы SOLID 65

в форме гексаэдра, предназначенные для моделирования элементов, допускающих трещинообразование при растяжении, а также позволяющих выполнять расчеты по нелинейной модели с учетом разрушения материалов на основе критерия прочности Willam – Warnke [14]. Для отображения трещин были введены функции пользователя, применяющие деформационный критерий Базанта [15].

Конечный элемент BEAM188 использовался для моделирования работы армирующих материалов. Это балочный элемент с изгибной жесткостью. Каждый продольный стержень модели был разделен на 180 конечных элементов (КЭ), каждый поперечный стержень на 18 элементов.

Для расчета армированных ледяных балок использовались следующие механические характеристики льда: начальный модуль упругости $E = 700$ МПа, одноосная прочность на сжатие $R_b = 0.55$ МПа, одноосная прочность на растяжение $R_{bt} = 0.4$ МПа, плотность $\rho = 930$ кг / м³, коэффициент Пуассона $\mu = 0.3$. Характеристики арматуры: начальный модуль упругости $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа, расчетное сопротивление $R_s = 355$ МПа.

Механические характеристики материалов, используемых для усиления льда в численных экспериментах, представлены в таблице: горячекатаная арматура А400 (образец № 1); стеклопластиковая композитная арматура (образец № 2); углерод-

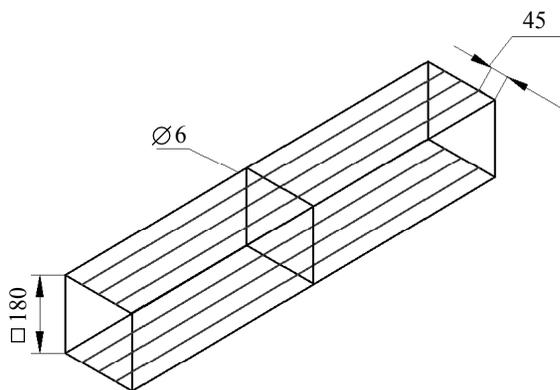


Рис. 2. Схема армирования ледяной балки
Fig. 2. Scheme of the ice beam reinforcement

ная арматура (образец №3); арамидокомпозитная арматура (образец № 4); комбинированная сочетанием стекла и базальта арматура (образец № 5). В дальнейшем образец без усиления будет обозначаться №0

Расчетные механические характеристики стальной и композитной арматуры

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

Результаты экспериментального и численного исследования.

Была проведена предварительная серия экспериментов по загрузке неармированных ледяных балок для оценки влияния поверхностного армирования на несущую способность образцов. Во время проведения экспериментов фиксировались результаты прогибов w , вызванные возрастающей нагрузкой F , приложенной к испытываемому образцу. Согласно экспериментальным данным, разрушающая нагрузка составляла 3.6 кН при численном расчете около 3.9 кН [13].

На рис. 3 представлены данные результатов модельного эксперимента при испытании армированного образца. Видно, что максимальная нагрузка, которую выдержали образцы в эксперименте, составила порядка 12 кН, что существенно превысило предельную нагрузку, которую смог выдержать неармированный образец.

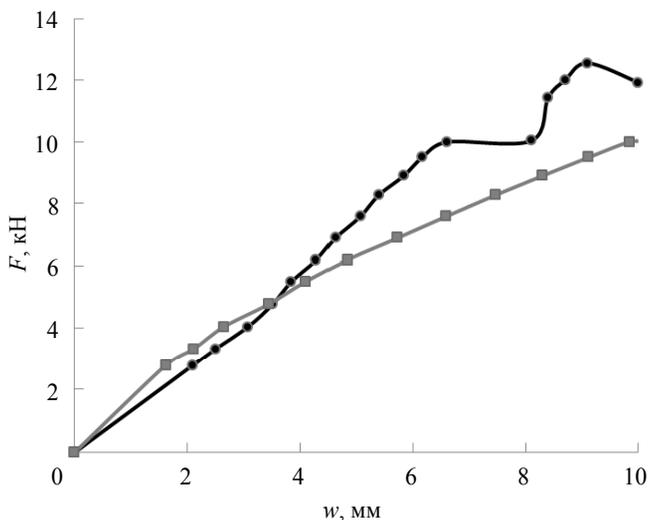


Рис. 3. Диаграмма зависимости прогиба армированного образца (A400) от нагрузки (—●— — результаты экспериментальных исследований, —■— — результаты численных исследований в ANSYS Workbench 17.2.)

Fig. 3. Diagram for a dependence of the reinforced sample A400 deflection on the load (—●— — experimental study results and —■— — numerical calculation results obtained using the ANSYS Workbench 17.2.)

При этом происходило образование сквозных трещин в испытуемых образцах, а максимальное значение прогиба составило около 10 мм, после чего происходило полное разрушение балок.

Как можно заметить, 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. На рис. 4 представлены фото разрушений ледовых балок под действием разрушающей нагрузки.

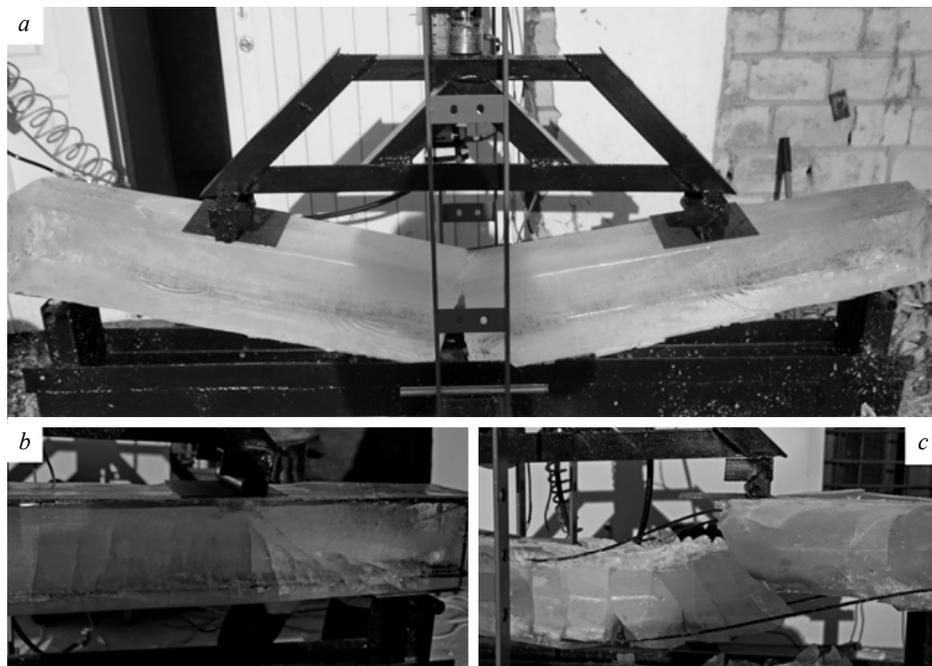


Рис. 4. Разрушение ледовых балок на экспериментальной установке под действием чистого изгиба: *a* – ледяная балка без армирования, *b* – формирование нормальных и наклонных трещин в армированной балке (A400), *c* – полное разрушение армированной балки (A400)
Fig. 4. Destruction of the ice beams under the action of pure bending on the experimental setup: (a) unreinforced ice beam, (b) appearance of the normal and inclined cracks in the reinforced beam A400, and (c) a complete destruction of the reinforced beam A400

На рис. 5, *a* представлена схема трещин в программном комплексе ANSYS, на рис. 5, *b* – напряжения в арматурном каркасе, смоделированном в программном комплексе ANSYS.

Схема трещин в соответствии с критерием Базанта [15] представлена значениями от -0.00017 до 0.018 (см. рис. 5, *a*). Значения критерия больше нуля соответствуют возникновению и открытию трещин в растянутой зоне балки.

Как видно из рис. 5, *b*, напряжения в арматуре растянутой зоны ледовой балки не достигали предела текучести и составляли около 117 МПа.

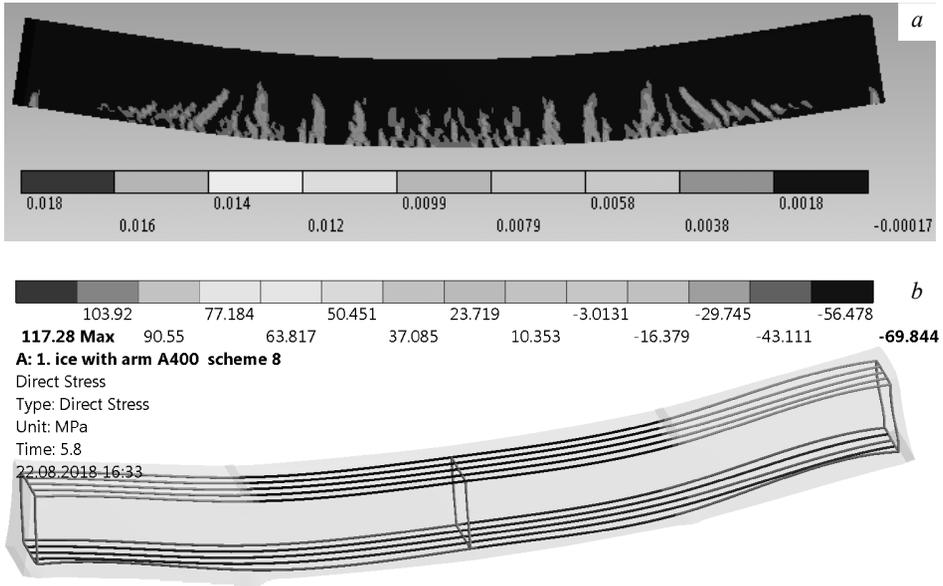


Рис. 5. Результаты численных расчетов в ПК ANSYS: *a* – схема трещин при разрушении ледовой балки, *b* – напряжения в арматуре (A400) при разрушении
Fig. 5. Numerical calculation results obtained by PC ANSYS: (*a*) diagram of the cracks during the ice beam destruction and (*b*) stresses in the reinforced sample A400 during destruction

Основные результаты численных расчетов, представленные в виде диаграмм зависимости нагрузки от прогиба для образцов, армированных различными материалами, показаны на рис. 6, *a*.

С учетом того, что нагрузка, при которой разрушился неармированный образец, составила 3.6 кН, можно судить о том, что несущая способность армированного образца намного выше. Напряжения в средних сечениях каждого из армированных образцов представлены на рис. 6, *b*.

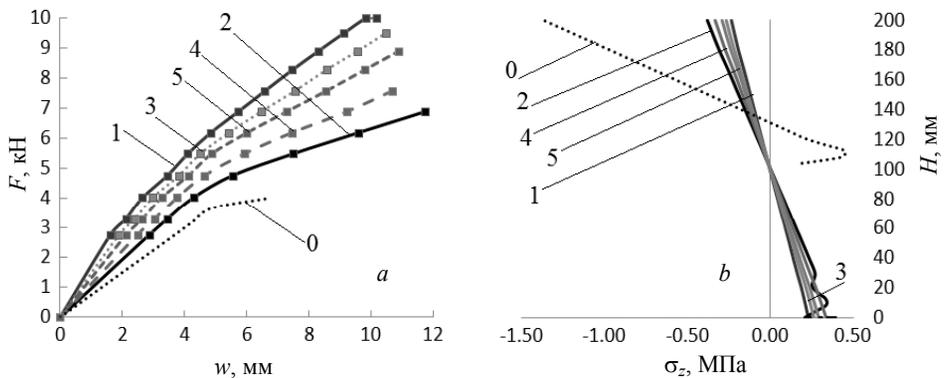


Рис. 6. Результаты численных расчетов: *a* – зависимость нагрузка-прогиб, *b* – распределение нормальных напряжений σ_z в сечении балки при нагрузке 3.6 кН
Fig. 6. Numerical calculation results: (*a*) load-deflection dependency and (*b*) normal stress σ_z distribution along the beam section at a load of 3.6 kN

Анализ данных показывает, что использование армирующих каркасов из различных композитных материалов приводит к существенному увеличению несущей способности льда. Наибольшую несущую способность по сравнению с неармированным показал образец, армированный стальной арматурой А400. Наименьшей несущей способностью обладали армированные образцы № 2 и 4. Максимальные напряжения при нагрузке 3.6 кН (предельная нагрузка, при которой неармированный образец №0 сохранял свою несущую способность) для образцов, армированных материалом № 1, 2, 3, 4, 5, составляли -0.23 , -0.38 , -0.26 , -0.33 и -0.29 МПа соответственно. Самый быстрый рост нормальных напряжений с увеличением нагрузки наблюдался в армированном образце № 2, самый медленный рост – в армированном образце № 1.

Выводы

В результате исследования можно сделать следующие выводы:

При проведении экспериментальных и численных исследований было установлено, что использование поверхностного упрочнения льда различными материалами по данной схеме армирования позволяет увеличить несущую способность с 92 до 178 %.

Разрушение образцов во всех случаях происходило в результате образования обширных трещин во льду, вызванных действием изгибающего момента в середине пролета балки. При этом арматура не достигала предела текучести.

Результаты модельного эксперимента и численного расчета (см. рис. 3) хорошо согласуются в упругой зоне. Что касается прогибов и разрушающих нагрузок, отклонения в сравнении данных не превышали 19 и 2 % соответственно. Это позволяет считать численные расчеты ледовых балок, армированных различными композитами, достаточно корректными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бычковский Н.Н., Гурьянов Ю.А. Ледовые строительные площадки, дороги и переправы, Саратов, 2005. 180 с.
2. Lu W.J., Lubbad R., Loset S. Out-of-plane failure of an ice floe: Radial-crack-initiation-controlled fracture // *Cold Regions Science and Technology*. 2015. No.119. P. 183–203. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.08.009.
3. Renshaw C.E., Schulson E.M., Sigward S.J.G. Experimental observation of the onset of fracture percolation in columnar ice // *Geophysical Research Letters*. 2017. No.44(4). P. 1795–1802. DOI: 10.1002/2016 GL071919.
4. Tippmann J.D., Kim H., Rhymer J.D. Experimentally validated strain rate dependent material model for spherical ice impact simulation // *Int. J. Impact Engineering*. 2013. No. 57. P. 43–54. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.01.013
5. ОДН 218.010-98. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ: введен 01.10.1998.: утвержден ФДС России от 1998-08-26 // Союздорнии Госстроя России. 1998.
6. Якименко О.В., Сиротюк В.В. Усиление ледовых переправ геосинтетическими материалами. Омск: СибАДИ, 2015. 168 с.
7. Yakimenko O.V., Sirotyuk V.V. Reinforcement of ice crossings // *Earth's Cryosphere*. 2014. V. 18. Iss. 1. P. 88–91
8. Sirotyuk V.V., Yakimenko O.V., Levashov G.M., Zakharenko A.A. Reinforcement of ice cover with geosynthetics materials // *Earth's Cryosphere*. V. 20. Iss. 3. 2016. P. 86–94.
9. Никитин П.Е., Никитина М.П. Способ создания армированной ледовой переправы для широких водоемов // Патент на изобретение РФ № 2569694, опубл. 27.11.2015.

10. Костенко А.В., Сердечный А.С., Сердечный А.А. Ледяная переправа // Патент на изобретение РФ № 2260648, опублик. 20.09.2005.
11. Zemlyak V.L., Kozin V.M., Vasil'ev A.S., Ipatov K.I. Experimental and numerical investigations of the influence of reinforcement on the load-carrying capacity of ice crossings // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2019. No. 56(1). P. 37–43.
12. 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 // *Proceedings of the Twenty-eighth International Ocean and Polar Engineering Conference*, Sapporo, Japan. 2018. P. 1511–1515.
13. 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.* 2018. 193. 012031. DOI: 10.1088/1755-1315/193/1/012031.
14. Willam K.J., Warnke K.J. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete // *Seminar of concrete structures subjected to triaxial stresses*. Bergamo, Italy, 1974. No. 19. P. 3–11.
15. Bazant Z.P., Cedolin L. Fracture mechanics of reinforced concrete // *J. Engineering Mechanics* – ASCE. 1980. P. 1287–1306.

Статья поступила 27.08.2018 г.

Kozin V.M., Vasil'ev A.S., Zemlyak V.L., Ipatov K.I. (2019) INVESTIGATION OF THE LIMIT STATE OF ICE COVER UNDER CONDITIONS OF PURE BENDING WHEN USING REINFORCING ELEMENTS. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 61. pp. 61–69

DOI 10.17223/19988621/61/6

Keywords: ice beam, surface reinforcement, load, pure bending, carrying capacity, numerical investigation, strength criterion.

The aim of the paper was an experimental and numerical investigation of the stress-strain state of the ice samples strengthened by surface reinforcement. The ice samples were reinforced with the welded reinforcing cages in a series of experiments performed in the winter of 2015/2016. The reinforcing steel A400 was used in the experimental study. A multifunctional loading unit was developed and assembled for the model experiments to be carried out. The unit consisted of a power frame, loading device, and measuring module. The results of experiments on the loading of the samples were compared with those obtained numerically using the ANSYS software suite. The samples were loaded under conditions of pure bending. The resulting load-deflection diagrams showed a high convergence when comparing experimental data to numerical results for a specified reinforcement scheme with steel A400. The simulation of ice beams and the corresponding calculations were performed by the ANSYS software. The beam samples were reinforced with various composite materials in accordance with a given scheme of reinforcement. The load-deflection diagrams for the ice samples reinforced with steel were compared with those for the samples reinforced with considered composite materials. The stress-strain state of the samples was determined at each loading step. The numerical calculations were performed on the basis of a nonlinear deformation model with account for appearance of the cracks in the samples. The authors assessed an increase in the load-bearing capacity of ice when using different composite materials, and analyzed their effect on the stress-strain state of the ice samples at various loading steps. The numerical model efficiency was tested using the ANSYS software suite at the specified physical and mechanical characteristics of the materials.

Financial support. The study is performed in the framework of the project No. 9.4934.2017 of the task for fulfillment of the government works in the field of science within a base part of the government task for higher education establishment.

KOZIN Victor Mikhaylovich (Doctor of Technical Sciences, Institute of Machining and Metallurgy, FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation). E-mail: vellkom@list.ru

VASIL'EV Aleksey Sergeevich (Candidate of Technical Sciences, Sholem Aleichem Amur State University, Birobidzhan, Russian Federation). E-mail: vasil-grunt@mail.ru

ZEMLYAK Vitaliy Leonidovich (Candidate of Physics and Mathematics, Sholem Aleichem Amur State University, Birobidzhan, Russian Federation). E-mail: vellkom@list.ru

IPATOV Konstantin Igorevich (Sholem Aleichem Amur State University, Birobidzhan, Russian Federation). E-mail: ipatov21@mail.ru

REFERENCES

1. Bychkovskiy N.N., Gur'yanov Yu.A. (2005) *Ledovye stroitel'nye ploshchadki, dorogi i perepravyy* [Ice construction sites, roads, and ferries]. Saratov.
2. Lu W.J., Lubbad R., Loset S. (2015) Out-of-plane failure of an ice floe: radial-crack-initiation-controlled fracture. *Cold Regions Science and Technology*. 119. pp. 183–203. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.08.009.
3. Renshaw C.E., Schulson E.M., Sigward S.J.G. (2017) Experimental observation of the onset of fracture percolation in columnar ice. *Geophysical Research Letters*. 44(4). pp. 1795–1802. DOI: 10.1002/2016 GL071919.
4. Tippmann J.D., Kim H., Rhymer J.D. (2013) Experimentally validated strain rate dependent material model for spherical ice impact simulation. *International Journal of Impact Engineering*. 57. pp. 43–54. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.01.013.
5. Common house needs 218.010-1998. (1998) *Instruktsiya po proektirovaniyu, stroitel'stvu i ekspluatatsii ledovykh pereprav* [Instruction on the design, construction, and operation of ice crossings]. SoyuzdorNII Gosstroy Rossii.
6. Yakimenko O.V., Sirotyuk V.V. (2015) *Usilenie ledovykh pereprav geosinteticheskimi materialami* [Strengthening of ice crossings by geosynthetic materials]. Omsk.
7. Yakimenko O.V., Sirotyuk V.V. (2014) Reinforcement of ice crossings. *Earth's Cryosphere*. 18(1). pp. 88–91.
8. Sirotyuk V.V., Yakimenko O.V., Levashov G.M., Zakharenko A.A. (2016) Reinforcement of ice cover with geosynthetics materials. *Earth's Cryosphere*. 20(3). pp. 86–94.
9. Nikitin P.E., Nikitina M.P. (2015) *Sposob sozdaniya armirovannoy ledovoy perepravyy dlya shirokikh vodoemov* [The method of creating a reinforced ice crossing for wide reservoirs]. Patent for invention of the Russian Federation No. 2569694.
10. Kostenko A.V., Serdechnyy A.S., Serdechnyy A.A. (2005) *Ledanaya pereprava* [Ice crossing]. Patent for the invention of the Russian Federation No. 2260648.
11. Zemlyak V.L., Kozin V.M., Vasil'ev A.S., Ipatov K.I. (2019) Experimental and numerical investigations of the influence of reinforcement on the load-carrying capacity of ice crossings. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 56(1). pp. 37–43. DOI: 10.1007/s11204-019-09566-x.
12. Kozin V.M., Zemlyak V.L., Vasilyev A.S., Ipatov K.I. (2018) The research of the stressed strain state of ice beams reinforced by surface reinforcement. *Proceedings of the Twenty-eighth International Ocean and Polar Engineering Conference 2013*. pp. 1511–1515.
13. Kozin V.M., Zemlyak V.L., Vasilyev A.S., Ipatov K.I. (2018) Experimental and numerical research of the stressed-deformed state of ice beams reinforced by surface reinforcement. *IOP Conf. Series: Earth and Environment*. 193(012031). DOI: 10.1088/1755-1315/193/1/012031.
14. Willam K.J., Warnke K.J. (1974) Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. *Seminar of Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses*. 19. pp. 3–11.
15. Bazant Z.P., Cedolin L. (1980) Fracture mechanics of reinforced concrete. *Journal of the Engineering Mechanics*. ASCE. pp. 1287–1306.

Received: August 27, 2018