

## ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК 539.3; 001.891.573; 519.6

DOI: 10.15372/KZ20230203

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГИБОВ  
И РАЗРУШАЮЩИХ НАГРУЗОК ПРИ УСИЛЕНИИ ЛЬДА ПРОДОЛЬНЫМИ  
СТЕРЖНЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ ПОЛИПРОПИЛЕНА И СТЕКЛОПЛАСТИКА****В.Л. Земляк<sup>1,\*</sup>, А.С. Васильев<sup>1</sup>, В.М. Козин<sup>2</sup>, Д.С. Жуков<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, 679015, Биробиджан, ул. Широкая, 70А, Россия<sup>2</sup> Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, 681005, Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1, Россия\* Автор для контакта, [vellkom@list.ru](mailto:vellkom@list.ru)

Вопрос применения композитных материалов на основе льда для строительства инженерных сооружений в сложных метеоусловиях в настоящее время остается малоизученным. При этом использование льда как строительного материала обусловлено простотой и низкой стоимостью изготовления. В свою очередь, лед может быть усилен различными дополнительными элементами, позволяющими изменить его физико-механические свойства в составе композитного материала. В работе представлены результаты экспериментального исследования поведения ледяных балок, усиленных армирующими элементами, при чистом изгибе. Для усиления использованы продольные стержни с разными физико-механическими характеристиками из стеклопластика и полипропилена. Выполнено сравнение полученных результатов с ранее проведенными экспериментами по нагружению ледяных балок, усиленных стальной арматурой. Сделан вывод об эффективности использования предложенных материалов для улучшения механических характеристик ледяного покрова и изучено их влияние на поведение образцов. Отмечено положительное влияние полипропилена на деформируемость образцов и их несущую способность. Предложена схематизация диаграмм деформирования ледяных балок при усилении стальной и стеклопластиковой арматурой, полипропиленовыми стержнями. Анализируется перспективность применения стеклопластиковых и полипропиленовых стержней в составе композита на основе льда.

**Ключевые слова:** ледяная балка, армирование, чистый изгиб, несущая способность, экспериментальное исследование.

**Ссылка для цитирования:** Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М., Жуков Д.С. Экспериментальное исследование прогибов и разрушающих нагрузок при усилении льда продольными стержневыми элементами из полипропилена и стеклопластика // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 2, с. 25–31. DOI: 10.15372/KZ20230203.

**EXPERIMENTAL STUDY OF DEFLECTIONS AND BREAKING LOADS ON ICE REINFORCED  
BY LONGITUDINAL ROD ELEMENTS FROM POLYPROPYLENE AND FIBERGLASS****V.L. Zemlyak<sup>1,\*</sup>, A.S. Vasilyev<sup>1</sup>, V.M. Kozin<sup>2</sup>, D.S. Zhukov<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Sholom-Aleichem Priamursky State University, Shirokaya str. 70A, Birobidzhan, 679015, Russia<sup>2</sup> Institute of Machining and Metallurgy, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Metallurgov str. 1, Komsomolsk-na-Amure, 681005, Russia\* Corresponding author, [vellkom@list.ru](mailto:vellkom@list.ru)

To date, the issue of using ice-based composite materials for engineering constructions under harsh weather conditions remains poorly understood. Application of ice as construction material is favored by its ease of use and low manufacturing cost. In turn, ice can be reinforced with various additional materials that change its physical and mechanical properties as part of an ice-based composite material. The results of an experimental study of the behavior of reinforced ice beams under pure bending are discussed. As a reinforcement, longitudinal rods with different physical and mechanical characteristics made of fiberglass and polypropylene were used. The results of the study were compared with previous experiments on loading ice beams reinforced with steel armature. It is concluded that the proposed materials can be efficiently used to improve the mechanical characteristics of the ice. There is a positive effect of polypropylene on the deformability of the samples, as well as their bearing capacity. Schematic diagrams of deformation of ice beams reinforced with steel and fiberglass reinforcement and with polypropylene rods are presented. Prospects for the use of fiberglass and polypropylene rods in the ice-based composite materials are discussed.

**Keywords:** ice beam, reinforcement, pure bending, carrying capacity, experimental research.

## ВВЕДЕНИЕ

По протяженности внутренних водных путей Россия занимает второе место в мире после Китая. В обширных районах Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока, где транспортная инфраструктура практически отсутствует, основным способом транспортировки является доставка грузов речными судами. Однако на сегодняшний день грузоперевозки по внутренним водным путям в нашей стране составляют менее 1 %. Одной из многих причин снижения грузооборота является ограниченная возможность ведения зимней навигации. В связи с этим вопрос использования ледяного покрова в качестве ледовых переправ, зимников и грузонесущих платформ становится все более актуальным.

Примеры успешного использования льда для строительства инженерных сооружений известны с начала XX в. [Нагродский, 1935; Lorch, 1977]. С интенсивным освоением районов Арктического бассейна возникла также задача проектирования и строительства ледовых аэродромов, для чего потребовалось глубокое понимание физико-механических свойств и структуры ледяного покрова. В это время К.Ф. Войтковским [1960] исследовались механические свойства льда. Дж.Т. Уилсон [Wilson, 1955] на основе экспериментальных данных разработал теоретическую модель поведения ледяного покрова под влиянием одиночного и парного движения нагрузок. В экспериментальных работах [Squire et al., 1988; Takizawa, 1988] были получены зависимости напряженно-деформированного состояния льда от скорости движения и параметров различных транспортных средств. В исследовании [Бычковский, Гурьянов, 2005] приведены методы расчета ледяного покрова рек и водохранилищ с целью устройства временных строительных площадок, подъездных путей и переправ. Тем не менее рост массы перевозимых грузов и сложное поведение ледяного покрова при его статическом и динамическом нагружении требуют новых подходов к использованию льда в качестве композитного материала повышенной прочности с заданными физико-механическими свойствами.

В работах [Vasiliev et al., 2015; Cherepanin et al., 2018; Buznik et al., 2019] показано, что методы усиления льда могут осуществляться на микроуровне путем добавления мелкодисперсных частиц в ледяной покров (фибры, мелких волокон и воднорастворимых соединений). В качестве армирующих элементов могут быть использованы наполнители в виде полимеров различного химического состава и морфологии [Buznik et al., 2017].

Традиционные методы повышения несущей способности ледяного покрова заключаются в дополнительном намораживании льда снизу или сверху, усилении льда деревянным колейным на-

стилом и пр. Опыт практической реализации этих методов показывает, что физико-механические свойства льда сильно зависят от внешних факторов в момент намораживания и не всегда могут соответствовать предъявляемым эксплуатационным характеристикам. В качестве усиления также могут применяться геосинтетические материалы [Сиротюк и др., 2016], наибольший эффект при этом достигается при использовании сеток из стекловолокна [Якименко, 2015]. Ранее авторами были получены результаты экспериментального и численного исследования напряженно-деформированного состояния ледяных образцов, усиленных продольными и поперечными армирующими элементами из стали и различных современных композитных материалов [Козин и др., 2019a]. Оценивалась эффективность использования различных схем армирования для повышения несущей способности льда. Несущая способность образцов, обладающих высокой степенью жесткости, значительно возросла (до 400 %). Однако использование стальной арматуры имеет ряд технологических и экологических ограничений, а эффективность и продолжительность эксплуатации ледовой переправы зависит также от упругопластических свойств льда, обусловленных внедрением в него элементов с упругими свойствами.

Целью работы было экспериментальное исследование прогибов и разрушающих нагрузок ледяных образцов, усиленных разным количеством упругих элементов, расположенных в зонах растяжения и сжатия под нагрузкой.

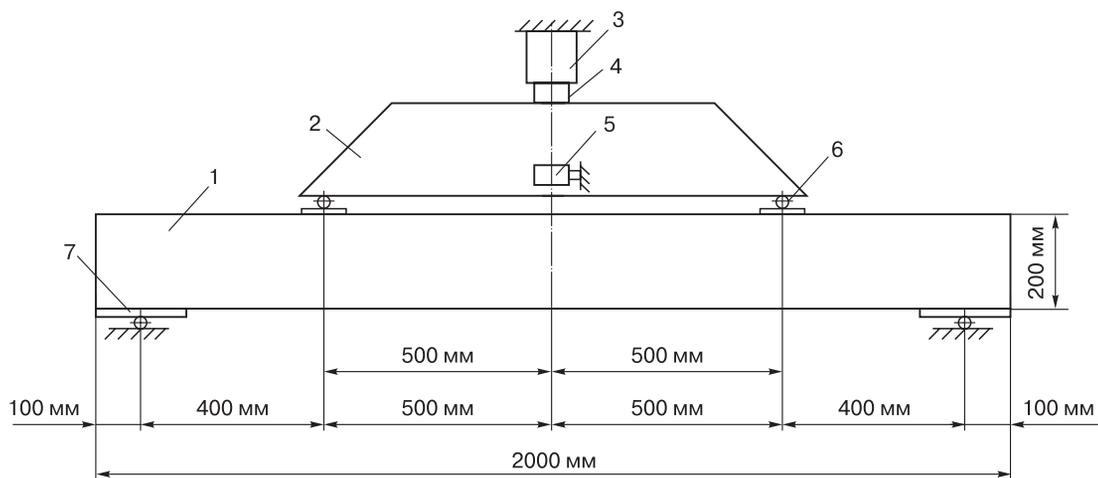
## ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Испытания ледяных образцов проводятся тремя методами: по разрушению балок, свободно лежащих на опорах; по разрушению консолей (клавишей); по разрушению круглой, свободно лежащей на кольцевой опоре ледяной пластины, нагружаемой в центре [Степанюк, 2001].

В рамках проводимых испытаний наиболее оптимальным оказался метод разрушения балок, свободно лежащих на двух опорах, чистым изгибом. Схема испытательного стенда приведена на рис. 1 [Козин и др., 2019б].

Исследование осуществлялось согласно рекомендациям секции ледовых проблем Международной ассоциации гидравлических исследований (МАГИ) [Test methods..., 2021].

Длина ледовых балок составила 2000 мм, ширина и высота 200 мм. В качестве армирующего материала использовались продольно расположенные стержни из арматуры стеклопластиковой композитной (АСК) и стержни полипропиленовые трубчатого сечения (СПТС), размещавшиеся в специально изготовленной герметичной опалубке, которая заливалась водой и подвергалась воз-



**Рис. 1. Схема экспериментальной установки:**

1 – ледяная балка; 2 – распределительная балка; 3 – гидrocилиндр; 4 – весовой терминал SH-20; 5 – датчик вертикальных перемещений LAS-Z; 6 – шарнирные опоры распределительной балки; 7 – шарнирные опоры ледяной балки [Земляк и др., 2019].

действию отрицательных температур. Количество элементов, расположенных в зонах растяжения и сжатия для обеспечения пространственной жесткости и целостности каркаса, составляло 2–3 шт. при армировании балок АСК и 1–3 шт. при армировании СПТС. Стержни располагались на одинаковом расстоянии друг от друга и нейтральной оси. Пример схемы армирования образцов СПТС приведен на рис. 2.

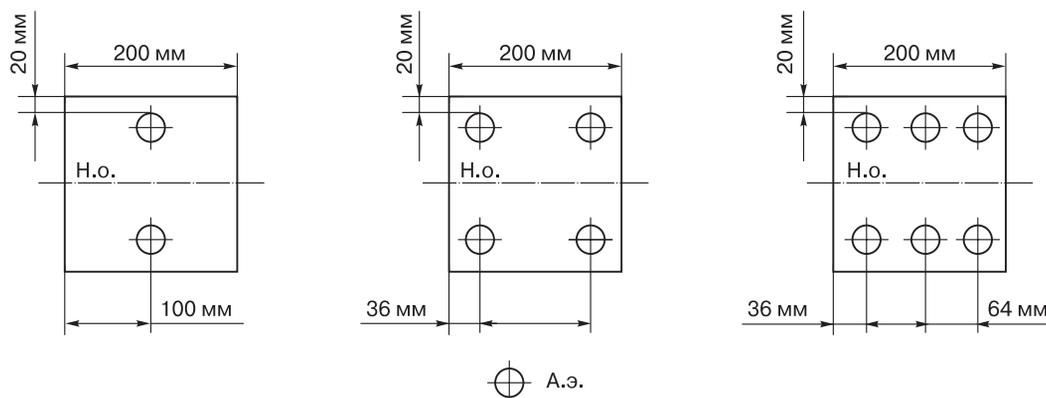
В связи с тем, что стержни в образцах СПТС имели значительный диаметр 32 мм, было принято решение провести испытания и для балок, армированных только двумя элементами. Для каждой схемы армирования было подготовлено три ледовых образца, которые замерзали в естественных условиях при температуре от  $-30$  до  $-15$  °С в течение 7 суток. Толщина защитного слоя льда от боковой плоскости балки до ближайшей поверх-

ности армирующего элемента составляла 20 мм. Нагружение осуществлялось до потери сплошности образца и появления ярко выраженных сквозных трещин. Скорость нагружения для всех экспериментов была одинаковой 135 кПа/с.

В качестве измерительного оборудования использовался цифровой инфракрасный датчик вертикальных перемещений GP2Y0E03 и тензодатчик веса LPA-22t с весовым терминалом SH-20. Процесс разрушения образцов фиксировался скоростной видеокамерой высокого разрешения VLXT-50M.I.

Эксперименты проводили в период с декабря 2020 по февраль 2021 г. при температуре окружающего воздуха от  $-20$  до  $-15$  °С.

Для оценки характера работы ледяных образцов данные экспериментов сопоставляли с результатами по нагружению неармированных ледяных



**Рис. 2. Схемы армирования образцов стержней пропиленовых трубчатого сечения.**

Н.о. – нейтральная ось. А.э. – армирующий элемент с обозначением центра тяжести.

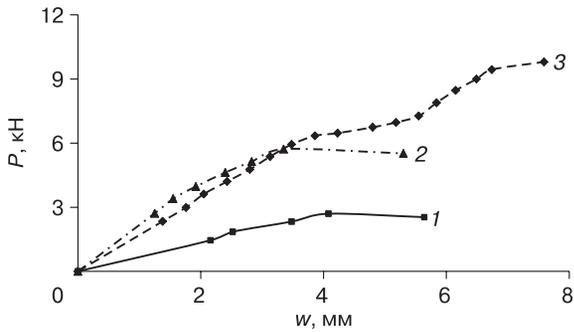


Рис. 3. Экспериментальные зависимости нагрузка–прогиб для ранее испытанных образцов:

1 – неармированный образец; 2 – А400-4-6; 3 – А400-6-6.

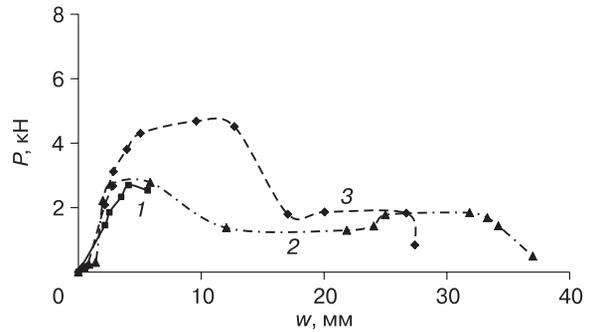


Рис. 4. Экспериментальные зависимости нагрузка–прогиб для образцов, усиленных арматурой стеклопластиковой композитной:

1 – неармированный лед; 2 – АСК-4-10; 3 – АСК-6-10.

Таблица 1. Механические характеристики армирующих материалов

Показатель	А400	АСК	СПТС
Предел прочности при растяжении $\sigma_{bc}$ , МПа	365	168	50
Предел прочности при сжатии $\sigma_{bc}$ , МПа	365	63	50
Начальный модуль упругости $E$ , МПа	$20 \cdot 10^4$	$50 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^3$

балок аналогичного размера и балок, усиленных армирующими каркасами из металлической арматуры А400 с одинаковым числом продольных связей (рис. 3) [Земляк и др., 2019].

Механические характеристики армирующих материалов приведены в табл. 1.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 4, 5 представлено сопоставление осредненных зависимостей нагрузка–прогиб, полу-

ченных путем обработки результатов не менее трех экспериментов для неармированных образцов льда и образцов, усиленных АСК и СПТС с разным количеством армирующих элементов в зонах растяжения и сжатия. В названиях АСК, СПТС и А400 первая цифра – общее количество стержней в сечении, вторая цифра – диаметр армирующего элемента.

На рис. 6 приведена схематизация диаграмм нагрузка–прогиб при усилении образцов стержневыми элементами с различными физико-механическими свойствами.

Визуализация процесса разрушения ледяной балки на примере образца СПТС-4-32 показана на рис. 7. Участок АБ представляет собой упругую часть диаграммы, где связь между напряжениями и деформациями линейная и подчиняется закону Гука. БВ – участок деформируемости, на котором образцы выдержали предельную разрушающую нагрузку  $P_{max}$  (см. рис. 7, а). Здесь происходило

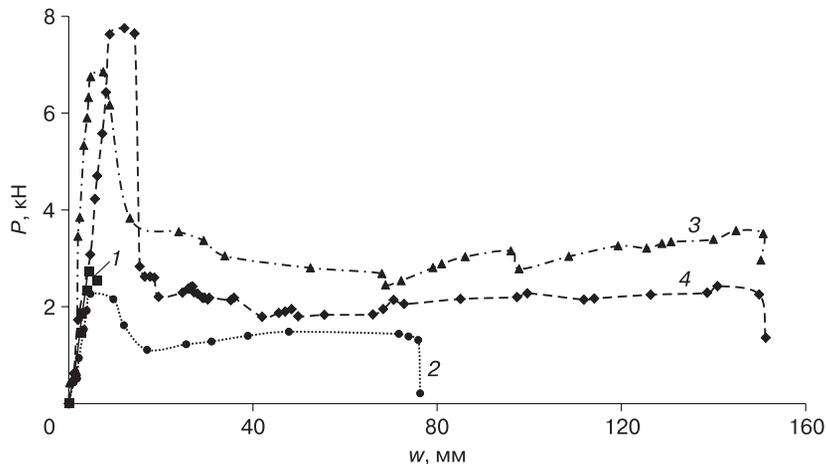


Рис. 5. Экспериментальные зависимости нагрузка–прогиб для образцов, усиленных стержнями полипропиленовыми трубчатого сечения (СПТС):

1 – неармированный лед; 2 – СПТС-2-32; 3 – СПТС-4-32; 4 – СПТС-6-32.

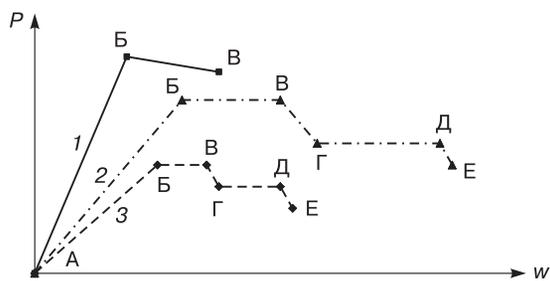


Рис. 6. Схематизация диаграмм нагрузка–прогиб для образцов, армированных различными элементами:

1 – А400; 2 – СПТС; 3 – АСК.

перераспределение усилий между материалом ледяной матрицы и армирующими элементами с образованием первых трещин. Следует отметить, что для образцов, усиленных арматурой А400, участок БВ характеризует ниспадающую ветвь, поэтому дальнейшее описание схематизации диаграмм будет относиться к образцам, усиленным СПТС и АСК. На участке ВГ наблюдалось снижение значений нагрузки, происходило завершение перераспределения усилий в образцах и наиболее активное образование трещин, а также разрушение льда в области растяжения в зоне действия максимального изгибающего момента (см. рис. 7, б). На участке ГД основную часть нагрузки принимали на себя армирующие элементы, во льду наблюдались пластические деформации, сопровождающиеся релаксацией напряжений. В процессе нагружения формировались сквозные магистральные трещины, однако армирующие каркасы, несмотря

Таблица 2. Основные результаты модельных экспериментов

Образец	$w$ , мм	$w_{\max}$ , мм	$P_{\max}$ , кН
СПТС-2-32	5.06	75.9	2.24
СПТС-4-32	7.50	150	6.85
СПТС-6-32	12.1	150	7.75
АСК-4-10	2.60	27.90	2.72
АСК-6-10	5.54	36.93	4.31
Неармированный	4.08	5.64	2.70
А400-4-6	3.35	5.30	5.72
А400-6-6	7.59	7.59	9.81

Примечание. В названиях АСК, СПТС и А400 первая цифра – общее количество стержней в сечении, вторая цифра – диаметр армирующего элемента.  $w$  – прогиб при показаниих максимальной несущей способности ледяных образцов;  $w_{\max}$  – максимальный прогиб образца после полного или частичного разрушения материала ледяной матрицы и перераспределения усилий между стержнями армирующего материала и льдом;  $P_{\max}$  – предельная разрушающая нагрузка.

на значительные деформации, продолжали сохранять сплошность ледяных балок (см. рис. 7, в). Наибольшую несущую способность показали образцы СПТС-4-32 и СПТС-6-32, для которых величина максимального прогиба  $w_{\max}$  составила ~150 мм. Отметим, что после снятия нагрузки образцы частично возвращались в исходное состояние, что говорит об эффективности работы упругих элементов (см. рис. 7, з).

В табл. 2 приведены основные результаты модельных экспериментов.

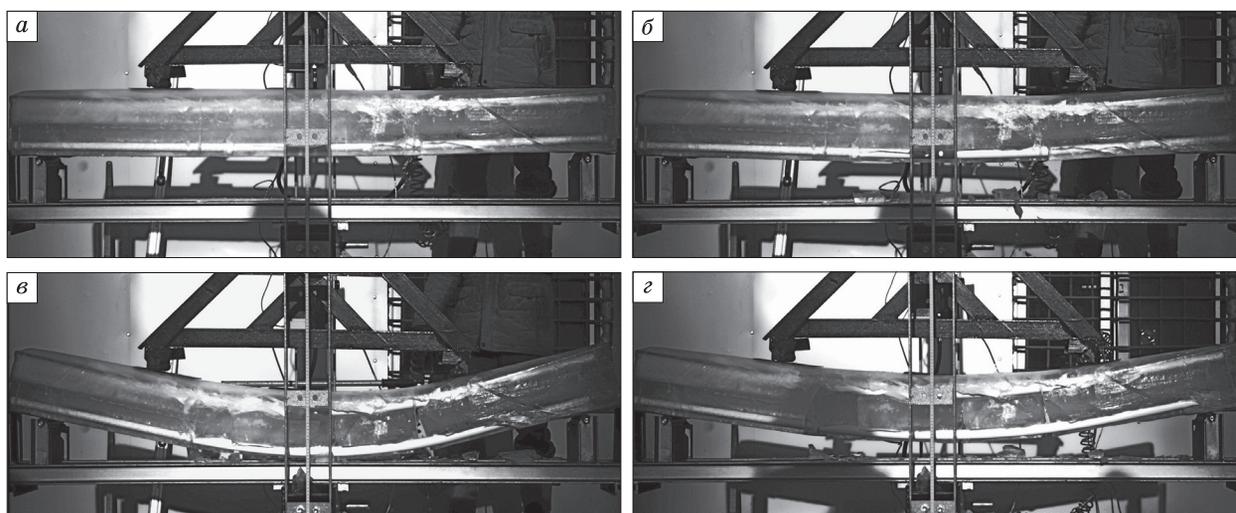


Рис. 7. Визуализация процесса разрушения образца СПТС-4-32 согласно участкам нагружения диаграммы нагрузка–прогиб (см. рис. 6).

а – участок БВ; б – участок ВГ; в – участок ГД; з – образец после снятия нагрузки.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Испытания показали, что деформируемость образцов АСК-4-10 и АСК-6-10 оказалась значительно выше, чем у неармированных балок. Неармированные ледяные балки с сопоставимой начальной жесткостью оказались значительно более хрупкими по сравнению с образцами, усиленными стеклопластиковой арматурой, в частности АСК-6-10. Для армированных образцов после достижения  $P_{\max}$  имели незначительную площадку, где деформации продолжали расти при нагрузке, составляющей менее половины от максимальных значений (см. рис. 4).

На рис. 5 видно, что образцы СПТС-2-32 не имели очевидного преимущества в сравнении с неармированными балками в первоначальной жесткости и предельной разрушающей нагрузке, но показывали значительно более высокую пластичность, причем даже в сравнении с образцами АСК-6-10. Образцы СПТС-4-32 и СПТС-6-32 во время проведения экспериментов значительно изгибались, соприкасались со стальной станиной и упирались в нее при прогибе ~150 мм, что говорит о наличии запаса пластичности у таких композитных материалов.

Сопоставление результатов экспериментов с результатами нагружения образцов, армированных стержнями А400, показало, что наличие стальной арматуры при небольшом диаметре ее сечения придает конструкции наибольшую жесткость, а образцы А400-6-6 выдержали нагрузку  $P_{\max} = 9.8$  кН. Однако балки, армированные стальной арматурой, значительно уступали образцам АСК и особенно СПТС в деформируемости и величине  $w_{\max}$ . Следует также отметить, что  $P_{\max}$  для СПТС-4-32 и СПТС-6-32 составила 6.85 и 7.75 кН, что сильно превысило значения  $P_{\max}$  для образцов АСК-4-10 и АСК-6-10.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные модельные эксперименты показали высокую перспективность использования методов поверхностного армирования для повышения несущей способности ледяного покрова. При внедрении в лед армирующих элементов, проявляющих упругие свойства, полученные диаграммы нагрузка–прогиб отличаются более сложным характером, чем при армировании льда жесткими элементами в виде металлической арматуры.

Использование армирующих элементов АСК и СПТС приводит к значительному увеличению предельной разрушающей нагрузки по сравнению с неармированными образцами. При одинаковом числе стержней использование СПТС дает более высокие показатели деформируемости и предельной разрушающей нагрузки по сравнению с армированием образцов АСК.

На начальном этапе нагружения образцы СПТС способны выдержать значительную нагрузку, которая резко падает после формирования и раскрытия магистральных сквозных трещин, далее в зоне сжатия происходит упрочнение льда, в результате чего прочность возрастает при сохранении сплошности, которую обеспечивает армирующий каркас, растет и несущая способность балки. Несмотря на большой запас деформируемости полученных композитных материалов, диаметр чаши прогиба может быть значительным (что исключает разрушение льда за счет изгиба), а силы сжатия и армирующие элементы сохраняют сплошность льда, обеспечив повышенную несущую способность ледовой переправы.

Полученные экспериментальные результаты для характеристик армированных ледяных образцов могут быть использованы в дальнейшем при проведении численных экспериментов нагружения усиленной ледяной пластины (ледовой переправы) движущейся нагрузкой (автотранспортным средством). Численное моделирование позволит заменить проведение крайне сложных и трудозатратных натуральных испытаний и определить оптимальные решения для армирования протяженных переправ и зимников, длина которых может составлять сотни метров.

## 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.
- Земляк В.Л., Козин В.М., Васильев А.С., Ипатов К.И.** Экспериментальное и численное исследование влияния армирования на несущую способность ледовых переправ // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2019, № 1, с. 14–19.
- Козин В.М., Васильев А.С., Земляк В.Л., Ипатов К.И.** Исследование несущей способности ледяных балок в условиях чистого изгиба при усилении армирующими элементами // Криосфера Земли, 2019а, т. XXIII, № 5, с. 67–72.
- Козин В.М., Васильев А.С., Земляк В.Л., Ипатов К.И.** Исследование предельного состояния ледяного покрова в условиях чистого изгиба при усилении армирующими элементами // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика, 2019б, № 61, с. 61–69.
- Нагородский Л.В.** Железнодорожные переправы. М., Трансжелдориздат, 1935, 120 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.
- Степанюк И.А.** Технологии испытаний и моделирования морского льда. СПб., Гидрометеоздат, 2001, 77 с.
- Якименко О.В.** Усиление ледовых переправ геосинтетическими материалами / О.В. Якименко, В.В. Сиротюк. Омск, СибАДИ, 2015, 168 с.

- Buznik V.M., Golushko S.K., Amelina E.V. et al.** Determining the law of ice deformation // J. Physics: Conf. Ser., 2019, Art. 012010.
- 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., Buznik V.M. et al.** Physico-mechanical properties of glacial composite materials reinforced by rusar-s fibers // Inorganic Materials: Appl. Res., 2018, vol. 9, No. 1, p. 114–120.
- Lorch W.** Snow travel and transport. The story of snow mobility in pictures. Macclesfield, England, The Gawsworth Series, 1977, 243 p.
- Squire V.A., Robinson W.H., Langhorne P.J., Haskell T.G.** Vehicles and aircraft on floating ice // Nature (London), 1988, No. 333, p. 159–161.
- Takizawa T.** Response of a floating sea ice sheet to a steadily moving load // J. Geophys. Res., 1988, No. 93, p. 5100–5112.
- Test methods** for model ice properties. International Towing Tank Conference (ITTC) – Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02.04-02, 2021, 19 p.
- Vasiliev N.K., Pronk A.D.C., Shatalina I.N. et al.** A review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions // Cold Regions Sci. and Technol., 2015, No. 115, p. 56–63.
- Wilson J.T.** Coupling between moving loads and flexural waves in floating ice sheets // US Army SIPRE Rep. 34, 1955, 28 p.
- Kozin V.M., Vasilyev A.S., Zemlyak V.L., Ipatov K.I.** Investigation of the limit state of ice cover under conditions of pure bending when using reinforcing elements. Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Matematika i Mekhanika, 2019b, No. 61, p. 61–69.
- Nagrodskiy L.V.** Zheleznodorozhnyye perepravy [Railway crossings]. Moscow, Transzheldorizdat, 1935, 120 p. (in Russian).
- 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.
- Stepanyuk I.A.** Tekhnologii ispytaniy i modelirovaniya morskogo l'da [Sea ice testing and modeling technologies]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2001, 77 p. (in Russian).
- Yakimenko O.V., Sirotyuk V.V.** Usileniye ledovykh pereprav geosinteticheskimi materialami [Strengthening of ice crossings by geosynthetic materials]. Omsk, SibADI, 2015, 168 p. (in Russian).
- Buznik V.M., Golushko S.K., Amelina E.V. et al.** Determining the law of ice deformation. J. Physics: Conference Series, 2019, Art. 012010.
- 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: Applied Research, 2017, vol. 8, No. 4, p. 618–625.
- Cherepanin R.N., Nuzhnyi G.A., Buznik V.M. et al.** Physico-mechanical properties of glacial composite materials reinforced by rusar-s fibers. Inorganic Materials: Applied Research, 2018, vol. 9, No. 1, p. 114–120.
- Lorch W.** Snow Travel and Transport. The Story of Snow mobility in Pictures. Macclesfield, England, The Gawsworth Series, 1977, 243 p.
- Squire V.A., Robinson W.H., Langhorne P.J., Haskell T.G.** Vehicles and aircraft on floating ice. Nature (London), 1988, No. 333, p. 159–161.
- Takizawa T.** Response of a floating sea ice sheet to a steadily moving load. J. Geophysical Research, 1988, No. 93, p. 5100–5112.
- Test methods** for model ice properties. International Towing Tank Conference (ITTC) – Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02.04-02, 2021, 19 p.
- Vasiliev N.K., Pronk A.D.C., Shatalina I.N. et al.** A review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions. Cold Regions Science and Technology, 2015, No. 115, p. 56–63.
- Wilson J.T.** Coupling between moving loads and flexural waves in floating ice sheets. US Army SIPRE Rep. 34, 1955, 28 p.

## References

Bychkovsky N.N., Guryanov Yu.A. Ledovyye stroitel'nyye ploshchadki, dorogi i perepravy [Ice construction sites, roads and ferries]. Saratov, Saratov State Technical University, 2005, 180 p. (in Russian).

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

Zemlyak V.L., Kozin V.M., Vasilyev A.S., Ipatov K.I. Experimental and numerical study of the effect of reinforcement on the bearing capacity of ice crossings. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [Soil Mechanics and Foundation Engineering], 2019, No. 1, p. 14–19.

Kozin V.M., Vasilyev A.S., Zemlyak V.L., Ipatov K.I. Bearing capacity of reinforced ice beams exposed to simple bending. Earth's Cryosphere, 2019a, vol. XXIII, No. 5, p. 57–61.

*Поступила в редакцию 12 мая 2022 г.,  
после доработки – 9 декабря 2022 г.,  
принята к публикации 30 января 2023 г.*