

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2022, №2, Том 14 / 2022, No 2, Vol 14 <https://esj.today/issue-2-2022.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/18SAVN222.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Земляк, В. Л. Определения напряжённно-деформированного состояния ледяного покрова при поверхностном армировании под воздействием статических и динамических нагрузок / В. Л. Земляк, А. С. Васильев, Д. С. Жуков // Вестник евразийской науки. — 2022. — Т. 14. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/18SAVN222.pdf>

**For citation:**

Zemlyak V.L., Vasilyev A.S., Zhukov D.S. Determination of the stress-strain state of the ice cover with surface reinforcement under the influence of static and dynamic loads. *The Eurasian Scientific Journal*, 14(2): 18SAVN222. Available at: <https://esj.today/PDF/18SAVN222.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

*Исследование выполнено за счет гранта Губернатора Еврейской автономной области (номер в ЕГИСУ НИОКТР И122041400063-3)*

**УДК 69.03**

**ГРНТИ 67.07**

**Земляк Виталий Леонидович**

ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия  
Доцент кафедры «Технических дисциплин»  
Кандидат физико-математических наук, доцент  
E-mail: vellkom@list.ru

**Васильев Алексей Сергеевич**

ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия  
Доцент кафедры «Технических дисциплин»  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: vasil-grunt@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7783-0000>  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=896244](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=896244)  
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57203895897>

**Жуков Дмитрий Сергеевич**

ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия  
Аспирант кафедры «Технических дисциплин»  
Инженер-исследователь  
E-mail: znuk\_offf@mail.ru

## **Определения напряжённно-деформированного состояния ледяного покрова при поверхностном армировании под воздействием статических и динамических нагрузок**

**Аннотация.** В обширных районах Сибири, Крайнего Севера и Дальнего Востока, в болотистых и лесистых регионах Российской Федерации, в районах, которых зачастую не имеется мостов через многочисленные ручьи и реки, и в остальных труднопроходимых условиях местности основным вариантом грузоперевозки являются перевозки по зимникам и ледовым переправам. Часто зимние автодороги используются для переправки грузов и оборудования на нефтегазодобывающие промыслы и месторождения, на которых ведется разведывательная деятельность. При этом, для определения несущей способности ледяного

покрова на переправах, с целью их устройства и усиления, необходимо знать механические характеристики льда. Анализ экспериментальных данных показывает, что максимальные прогибы и напряжения во льду возникают при скоростях движения нагрузки, близких к критическим. Поэтому случай равенства скорости движения критической, является расчетным при решении задач разрушения льда при движении нагрузки.

Целью работы является определение физико-механических характеристик ледяного покрова с помощью модельных экспериментов и проверка их корректности на основе аналитических выражений модели.

В работе выполнены исследования по определению модуля Юнга и прочности на изгиб для льда при усилении образцов стальной арматурой для различных схем армирования. Разработана модель для вычисления прогибов и напряжений для усиленного различными схемами армирования льда, при движении нагрузки по его поверхности. В модельных экспериментах использовались образцы в виде ледовых балок. Их физико-механические свойства определялись с помощью испытаний проводимых на специальном нагружающем устройстве. Разрушение происходило под действием чистого изгиба. Из модельных экспериментов вычислялись приведённые модули упругости, значения которых затем подставлялись в разработанную аналитическую модель.

**Ключевые слова:** ледовая переправа; ледяная балка; физико-механические характеристики; модельный эксперимент; численный эксперимент; нагружающее устройство; прогибы; напряжённо-деформированное состояние

## Введение

Начиная с 30-х годов XX в. ледяной покров активно используется в качестве грузонесущих платформ для размещения стационарных сооружений и оборудования на зимних полярных станциях, а также при оборудовании ледовых аэродромов. Для доставки грузов, пассажиров и техники в этих районах широко используются автозимники и ледовые переправы. По данным МЧС, ежегодно в России официально действует до 500 ледовых переправ. Часто зимние автодороги используются для перевозки грузов и оборудования на нефтегазодобывающие промыслы и месторождения, на которых ведется разведывательная деятельность, а также для перевозки пассажиров в труднодоступные населенные пункты. По данным Комитета Совета Федерации по делам Севера и малочисленных народов, до 65 % населённых пунктов в ХМАО, 56 % — в Якутии, 81 % населённых пунктов в Чукотском АО не имеют круглогодичного выхода на дороги с твёрдым покрытием. При этом длина переправ колеблется от сотен метров до сотен километров (оз. Байкал, р. Енисей и т. п.). Стоит отметить трудности прогнозирования поведения льда при различных видах нагружения (статическом и динамическом). Данные о напряженно-деформированном состоянии (НДС) ледяного покрова усиленного армирующими элементами с целью повышения его несущей способности вообще отсутствуют.

Известно, что при перемещении нагрузки с определенной (критической) скоростью по поверхности льда, в системе «лед-вода» возможно возникновение прогрессивных изгибно-гравитационных волн, при определенной интенсивности которых может произойти частичное или полное разрушения льда [1]. Анализ экспериментальных данных показывает, что максимальные прогибы и напряжения во льду возникают при скоростях движения нагрузки, близких к критическим  $v_p$ . Поэтому случай  $v = v_p$  является расчетным при решении задач разрушения льда при движении нагрузки [2; 3].

В связи с этим весьма актуальной становится задача прогнозирования несущей способности льда в зависимости от его физико-механических свойств от воздействия на него

движущихся нагрузок. Решение этой задачи невозможно без знания физико-механических характеристик ледяного покрова. 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 Kim H., Keune J.N. [4]; Lu Wenjun, Lubbad R., [5]; Renshaw C.E., Schulson E.M., Sigward S.J.G. [6]; Tippmann J.D., Kim H., Rhymer J.D. [7]; Goldstein R.V., Osipenko N.M. [8]; Vasilyev A.S. [9], Kozin V.M. [10].

Целью работы является определение НДС ледяного покрова с момента начала его нагружения до полного разрушения. Цель достигается путем использования известных математических зависимостей. Физико-механические свойства армированного ледяного покрова получены экспериментальным путем, при проведении автором проекта полунатурных модельных экспериментов в лаборатории ледотехники Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сделать литературный обзор и изучить способы усиления ледовых переправ, выявить нерешенную проблему для исследования;
- изучить метод определения напряженно-деформированного состояния при движении по нему нагрузки, на основе дифференциального уравнения изгиба ледяной пластины.
- получить на основе модельных экспериментов физико-механические свойства льда, как чистого, так и усиленного армирующими каркасами.

## 1. Физико-техническое обеспечение экспериментальных исследований

Из-за большой трудоемкости натуральных исследований колебаний ледяного покрова, сложности инструментальных замеров прогибов и напряжений в бесконечной ледяной пластине экспериментаторы часто обращаются к модельным экспериментам. При этом для простоты моделирования изучаются плоские колебания пластин, т. е. балок-полосок.

На несущую способность ледяного покрова существенное влияние оказывают длительность времени приложения и характер нагрузки. Обычно выделяют три характерных режима нагружения льда:

- динамический, при котором упругие свойства льда проявляются полностью, а неупругие приводят к диссипации энергии;
- статический, когда силами инерции можно пренебречь;
- режим длительного нагружения, при котором полностью проявляются вязкие свойства льда.

Ледяной покров для большинства статических задач со сравнительно малым временем приложения нагрузки можно рассматривать как упругую однородную пластину, лежащую на упругом основании гидравлического типа.

Из всего многообразия основных прочностных характеристик льда в рамках осуществляемого исследования, наибольший интерес представляют предел прочности льда на изгиб  $\sigma_i$  и модуль упругости  $E$ .

Для определения прочности модельного льда на изгиб  $\sigma_u$  используются три основных метода:

- разрушение балок, свободно лежащих на опорах;
- разрушение круглой, свободно лежащей на кольцевой опоре, ледяной пластины, нагружаемой в центре;
- разрушение консолей (клавишей) [11].

Для первого способа из ледяного покрова вырезается прямоугольная балка, которая устанавливается на двух поперечных опорах (призматической либо цилиндрической формы) и нагружается по середине между опорами. Величина  $\sigma_u$  вычисляется по формуле:

$$\sigma_u = \frac{3Pl}{2bh^2}, \quad (1)$$

где  $P$  — разрушающая нагрузка;  $l$  — расстояние от линии действия нагрузки до линии закрепления консоли;  $b$  — ширина;  $h$  — толщина.

Т. к. величина  $\sigma_u$  при этом существенно зависит от температуры и скорости нагружения образца, то необходимы дополнительные измерения этих величин при проведении испытаний [11].

Второй способ получил распространение в связи с простотой технологии выпиливания образцов из кернов, вырезанных кольцевым буром. Величина  $\sigma_u$  в этом случае определяется по формуле [11]:

$$\sigma_u = \frac{3Pl}{2\pi m h_{nn}^2} \left[ m + (m+1) \ln \frac{r}{r_0} - (m-1) \frac{r_0}{4r^2} \right], \quad (2)$$

где  $m$  — величина, обратная коэффициенту Пуассона ( $m \gg 3$ );  $h_{nn}^2$  — толщина пластины;  $r$  — рабочий радиус пластины (внутренний радиус кольцевой опоры);  $r_0$  — радиус распределения нагрузки («пятна» нагружения).

Установлено, что значения  $\sigma_u$ , полученные вторым способом, обычно больше значений  $\sigma_u$ , полученных первым способом. Статистически достоверно определена связь между изгибной прочностью льда определяемой этими способами [12]:

$$(\sigma_u)_1 = 0.65(\sigma_u)_2. \quad (3)$$

Третий способ используется в двух вариантах. В первом случае из льда вырезается прямоугольная балка и один конец закрепляется в испытательном устройстве, второй — нагружается, тогда величина  $\sigma_u$  определяется по формуле [11]:

$$\sigma_u = \frac{6Pl}{bh^2}. \quad (4)$$

Во втором случае консоль вырезается непосредственно в ледяном покрове и остается скрепленной с ним одним из своих концов. Таковую консоль называют клавишей. Нагрузка на свободный конец клавиши осуществляется как снизу вверх (из воды в воздух), так и сверху вниз, при этом анализ результатов испытаний показывает, что направление действия нагрузки принципиального значения не имеет.

Результаты испытаний в первом и втором случаях обычно существенно различаются. Значения  $\sigma_u$ , полученные при испытаниях клавиш, значительно меньше. В работе [13] основной причиной этого считается концентрация напряжений в области скрепления консоли с ледяным полем и предлагается умножить на эмпирически найденный коэффициент, равный 2.8.

Секция ледовых проблем МАГИ (Международная ассоциации гидравлических исследований) в 1980 г. предложила ряд рекомендаций по проведению испытаний, а именно при испытаниях ледяных балок и клавиш прямоугольного сечения целесообразно задавать некоторые оптимальные соотношения между размерами испытываемого образца (консоли, балки). В частности, во многих работах установлено, что наилучшие результаты получаются, когда  $b = h$ , а длина  $l$  примерно равна 8–8.5h [12]. В работе [14] рекомендуется принимать  $l = 10h$ . В рекомендациях МАГИ указываются близкие величины:  $b = 1 \div 2h$ ;  $l = 7 \div 10h$ .

Упругие характеристики льда определяются в первую очередь модулем Юнга. Модуль упругости в статических методах определяют при сжатии и растяжении образцов по относительному удлинению в момент разрушения:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  — относительное удлинение.

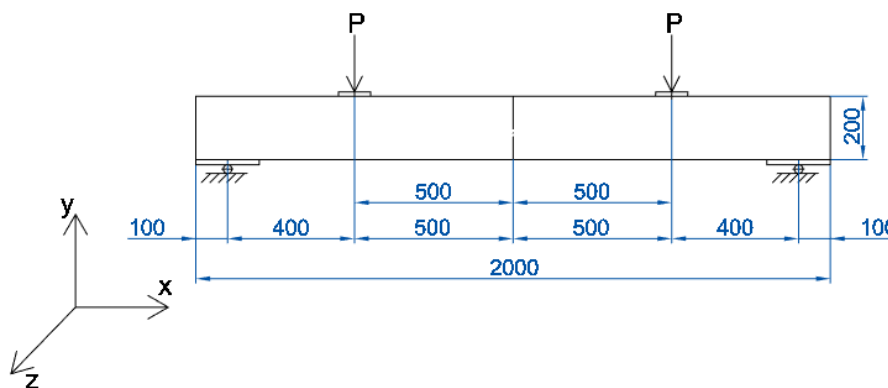
При изгибе балок на двух опорах (рис. 1) модуль Юнга определяют по формуле:

$$E = \frac{Pl^3}{24fI_z} \left( \frac{3a}{l} - \frac{4a^3}{l^3} \right); \quad (6)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_z}{W_z}, \quad (7)$$

где  $P$  — нагрузка;  $l$  — рабочая длина образца (между опорами);  $b$  — ширина балки;  $h$  — высота балки;  $f$  — величина прогиба;  $I_z$  — момент инерции сечения в плоскости изгиба;  $W_z$  — момент сопротивления сечения,  $M_z$  — максимальный изгибающий момент в сечении при разрушающей нагрузке.

При этом модуль Юнга определяется на упругом (линейном) участке диаграммы нагрузка-прогиб.



**Рисунок 1.** Расчётная схема модельных экспериментов при чистом изгибе

Результаты по определению  $E$  статическими методами существенно зависят от условий проведения экспериментов. Это связано с тем, что значение модуля упругости должно определяться только в области упругих деформаций. При статических же испытаниях, рассмотренными методами, обязательно проявляют себя пластические деформации, т. е.

измеренная величина деформации обычно превышает истинную, и измеренные значения  $E$  оказываются заниженными.

Учитывая цели и задачи данного исследования, для определения прочностных и упругих характеристик модельного льда был выбран способ разрушения балок, свободно лежащих на двух опорах. Использовался статический вид нагружения равномерно распределенной нагрузкой до полного разрушения испытуемых образцов в условиях чистого изгиба. Размеры образцов ледяных балок  $L \times B \times H = 2000 \times 200 \times 200$  мм выбраны в соответствии с известными рекомендациями описанными выше.

## 2. Определение напряжённо-деформированное состояние ледяного покрова, находящегося под действием движущейся нагрузки

Рассмотрим установившееся движение сосредоточенной нагрузки  $P$  с постоянной скоростью  $v$ . Дифференциальное уравнение изгиба ледяной пластины в этом случае записывается в виде:

$$\frac{Gh^3}{3} \left( 1 + \tau_\phi \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla^4 w + \rho_w g w + \rho_l h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \rho_w \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} = P \delta(x-vt, y-0), \quad (8)$$

где  $D = \frac{Gh^3}{3}$  — цилиндрическая жёсткость ледяной пластины;  $G$  — модуль упругости льда при сдвиге;  $\tau_\phi$  — время релаксации деформаций;  $\nabla$  — оператор Набла;  $\rho_w$  и  $\rho_l$  — плотности воды и льда соответственно;  $h$  — толщина льда;  $w$  — прогиб льда;  $\Phi$  — потенциал движения жидкости;  $\delta$  — дельта-функция Дирака;  $x$  и  $y$  — координаты на пластине.

Для бесконечной области дельта-функция может быть представлена двойным интегралом Фурье:

$$\delta(x-vt, y-0) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\{-i[\lambda(x-vt) + \eta y]\} d\lambda d\eta. \quad (9)$$

Тогда прогибы льда  $w(x, y, t)$  и потенциал  $\Phi(x, y, z, t)$  можно представить в виде [2]:

$$w(x, y, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} w_{\lambda\eta} \exp\{-i[\lambda(x-vt) + \eta y]\} d\lambda d\eta, \quad (10)$$

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_{\lambda\eta} ch[(H+z)\sqrt{\lambda^2 + \eta^2}] \exp\{-i[\lambda(x-vt) + \eta y]\} d\lambda d\eta. \quad (11)$$

Очевидно, чтобы найти функцию  $w(x, y, t)$  необходимо определить коэффициенты  $w_{\lambda\eta}$ . Для этого подставим записанные выше выражения для  $\delta(x-vt, y-0)$ ,  $w(x, y, t)$  и  $\Phi(x, y, z, t)$  в решаемое дифференциальное уравнение в частных производных и учтём линеаризованное кинематическое условие на границе льда и воды, которое имеет вид:

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (12)$$

В результате всех математических преобразований, максимальные прогибы, нормальные и касательные напряжения равны:

$$w(x, y, t) = \frac{q}{\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{C(A \cdot \cos \varphi - B \cdot \sin \varphi) d\lambda d\eta}{A^2 + B^2}; \quad (13)$$

$$\tau_{xy} = \frac{2Ghq(1-\mu)}{\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{C\lambda\eta}{A^2 + B^2} [A \cdot \cos \varphi - B \cdot \sin \varphi + \tau_\phi \nu \lambda (A \cdot \sin \varphi + B \cdot \cos \varphi)] d\lambda d\eta; \quad (14)$$

$$\sigma_x = \frac{2Ghq}{\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{C(\lambda^2 + \mu\eta^2)}{A^2 + B^2} [A \cdot \cos \varphi - B \cdot \sin \varphi + \tau_\phi \nu \lambda (A \cdot \sin \varphi + B \cdot \cos \varphi)] d\lambda d\eta; \quad (15)$$

$$\sigma_y = \frac{2Ghq}{\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{C(\eta^2 + \mu\lambda^2)}{A^2 + B^2} [A \cdot \cos \varphi - B \cdot \sin \varphi + \tau_\phi \nu \lambda (A \cdot \sin \varphi + B \cdot \cos \varphi)] d\lambda d\eta, \quad (16)$$

где

$$A = \lambda \eta \left( \frac{Gh^3}{3} (\lambda^2 + \eta^2)^2 + \rho_s g - \rho_s h \lambda^2 \nu^2 - \frac{\rho_s \lambda^2 \nu^2}{\sqrt{\lambda^2 + \eta^2} \operatorname{th}(H \sqrt{\lambda^2 + \eta^2})} \right); \quad (17)$$

$$B = \frac{Gh^3}{3} \tau_\phi \lambda^2 \eta \nu (\lambda^2 + \eta^2)^2 \quad C = \sin \lambda a \sin \eta b, \quad \varphi = \lambda(x - vt) + \eta y. \quad (18)$$

### 3. Результаты и их обсуждение

Используя ранее полученные зависимости для прогиба и для напряжений и подставляя в них соответствующие значения, сделаем необходимые вычисления. Расчеты выполнены в два этапа. В первом случае для динамического нагружения, т. е. при скоростях движения нагрузки свыше 7 м/с, во втором для статического при скоростях движения нагрузки менее 7 м/с.

Схемы армирования представлены на рисунках 1–3. Армирование ледяного покрова выполнялось стальной арматурой А400. Схемы № 1–5 представлены каркасы с дополнительными поперечными связями — от одной до пяти на каркас. При этом, как показали результаты испытаний модельных образцов, поперечные связи не оказали существенного влияния на несущую способность образцов и их модуль упругости, поэтому результаты механических характеристик для схем № 1–5 объединялись в единый результат.

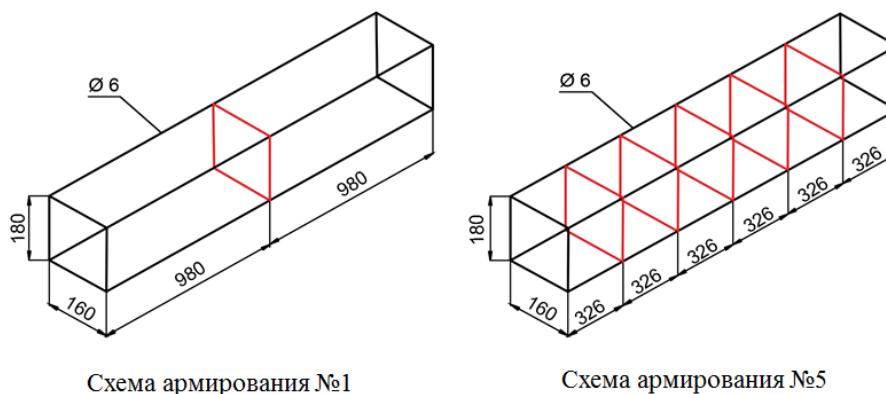
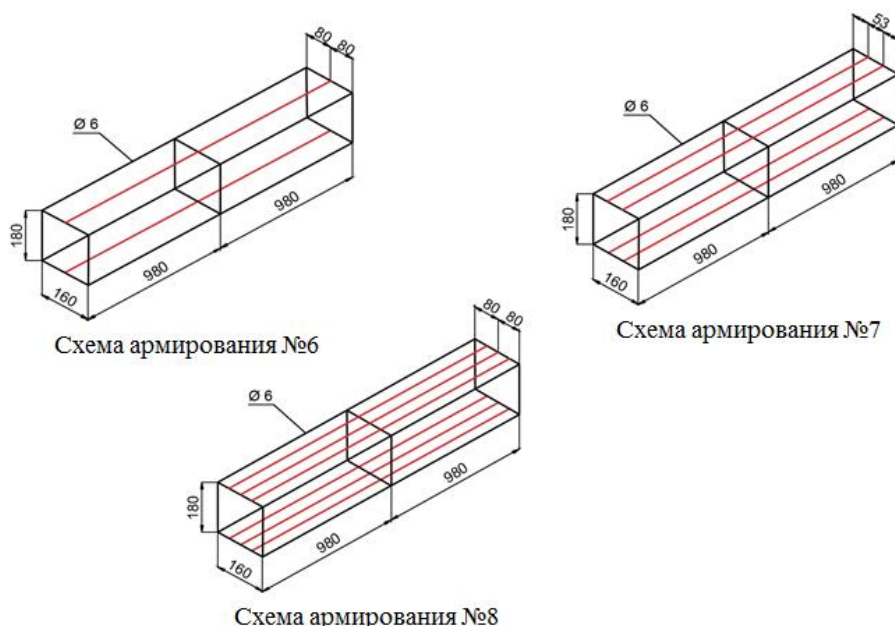
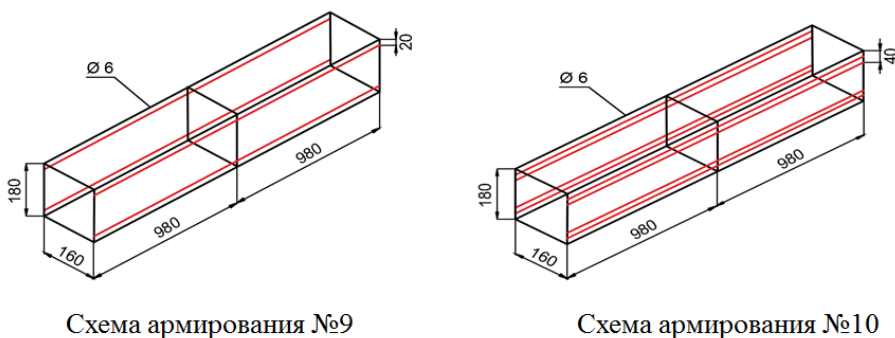


Рисунок 2. Армирующие каркасы первой группы с различным количеством поперечных связей



**Рисунок 3.** Армирующие каркасы второй группы с различным количеством продольных связей в верхней и нижней плоскостях

На рисунке 3 представлены схемы армирования № 6, № 7 и № 8, соответственно, с одним, двумя, тремя дополнительными арматурными стержнями, расположенными в верхней и нижней плоскостях каркаса. Также проводились модельные эксперименты с каркасами, где верхние части боковых стенок армировались дополнительно одним или двумя стержнями, как представлено на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Армирующие каркасы третьей группы с различным количеством продольных связей в боковой поверхности

В результате модельных экспериментов определялись прогибы и разрушающая нагрузка ледяных балок. Для каждой схемы армирования было изготовлено и испытано по 6 образцов, затем данные прогибов и разрушающей нагрузки усреднялись в общий результат.

Результаты исследования представлены в таблице 1. Первый столбец содержит в себе наименование схем армирования, второй и третий — результаты модельных экспериментов для разрушающей нагрузки и максимальных прогибов ледяных балок при данной нагрузке. Приведённый модуль Юнга (с учётом стержней арматуры в сечении) в четвёртом столбце, определялся для балок согласно формуле 6. Напряжения от статической нагрузки в пятом столбце определялись согласно формуле (7). На основе модуля Юнга определялся модуль сдвига  $G$ , а с его помощью на основе формул (13) и (15) — динамические прогибы  $w$  и напряжения  $\sigma_x$ , соответственно, в шестом и седьмом столбцах таблицы 1.



Таблица 1

Результаты исследования

Схема армирования	Разруш. нагрузка (эксперимент), Р, кН	Прогибы (эксперимент), w, м	Модуль Юнга, E, ГПа	Напряжения (статика), $\sigma_x$ , Па	Прогибы расчет (динамика), w, м	Напряжения (динамика), $\sigma_x$ , Па
Неармированные образцы	3,45	0,0056	0,77	87680	0,0034	105600
Схема № 1–5	5,63	0,0053	1,328	158900	0,0044	115700
Схема № 6	9,05	0,0077	1,491	259500	0,0067	289800
Схема № 7	10,03	0,0091	1,374	284100	0,0077	318000
Схема № 8	11,93	0,01	1,461	342800	0,0093	382900
Схема № 9	10,57	0,0082	1,611	309100	0,0076	344300
Схема № 10	14,68	0,011	1,668	431900	0,01	480600

Из таблицы видно, что прогибы льда при статике и динамике разнятся от 5 до 40 %, при этом наибольшая разница имеется для неармированного льда. Напряжения во льду от статической и динамической нагрузок также имели отклонение от 7 до 28 %.

Заключение

В рамках выполненного исследования стоит сделать следующие выводы:

- выполненные экспериментальные исследования показали высокую перспективность использования методов поверхностного армирования для повышения несущей способности ледяного покрова;
- как показал предварительный модельный эксперимент, использование армирующих каркасов из стальной арматуры диаметром 6 мм приводит к увеличению величины нагрузки выдерживаемой образцом шириной 20 см от 1,6 до 4,2 раза в зависимости от схемы армирования;
- несущая способность от числа поперечных связей не изменялась;
- наиболее эффективно в составе ледовой балки работали каркасы с дополнительными продольными связями, особенно при их расположении в боковой плоскости вблизи поверхностей максимального растяжения и сжатия;
- предложенные схемы армирования можно использовать для льда значительно меньшей толщины (порядка 30–40 см) чем при традиционных методах создания переправ (80–100 см), что может существенно продлить срок их эксплуатации;
- данные расчетов достаточно хорошо согласуются с данными модельных экспериментов по величинам прогибов, что говорит о корректности использования предложенного алгоритма;
- большая разница между некоторыми значениями прогибов может быть объяснена осреднённым выбором значения времени релаксации деформаций равным 10 с, что связано с отсутствием достоверных экспериментальных данных для ледяного покрова, в том числе при его поверхностном армировании;
- максимальные продольные и поперечные напряжения возникали в образцах с максимальной несущей способностью;
- зная зависимость между прогибом и нагрузкой, а также модуль упругости испытываемых образцов, в том числе при использовании армирующих элементов,

можно рассчитать напряженно-деформированное состояние ледяного покрова при использовании его в качестве грузонесущих платформ (статическое нагружение) и ледовых переправах (динамическое нагружение) в любой момент времени, что позволяет спрогнозировать момент образования трещин вплоть до его полного разрушения;

- полученные экспериментальные данные могут быть использованы для разработки рекомендаций по строительству и эксплуатации армированного ледяного покрова в качестве ледовых переправ и грузонесущих платформ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Земляк В.Л. Экспериментальное и численное исследование влияния армирования на несущую способность ледовых переправ / В.Л. Земляк, В.М. Козин, А.С. Васильев, К.И. Ипатов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2019. — № 1. — С. 14–19.
2. Жёсткая, В.Д. Численный расчет напряженно-деформированного состояния ледяного покрова, находящегося под действием нестационарной нагрузки / В.Д. Жёсткая, С.Д. Чижиумов — М.: Академия Естествознания, 2007. — 112 с.
3. Козин В.М., Онищук А.В., Марьин Б.Н. и др. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов. — Владивосток: Дальнаука, 2005. 191 с.
4. Kim H. Compressive strength of ice at impact strain rates / H. Kim, J.N. Keune // Journal of Materials — 2007. — № 42(8). — P. 2802–2806.
5. Lu W.J. Out-of-plane failure of an ice floe: Radial-crack-initiation-controlled fracture / W.J. Lu, R. Lubbad, S. Loset // Cold regions science and technology. — 2015. — № 119. — P. 183–203.
6. Renshaw C.E. Experimental observation of the onset of fracture percolation in columnar ice / C.E. Renshaw, E.M. Schulson, S.J.G. Sigward // Geophysical research letters. — 2017. — № 44(4). — P. 1795–1802.
7. Tippmann J.D. Experimentally validated strain rate dependent material model for spherical ice impact simulation / J.D. Tippmann, H. Kim, J.D. Rhymer // International journal of impact engineering — 2013. — № 57. — P. 43–54.
8. Goldstein R.V. Some aspects of strength in sea ice mechanics / R.V. Goldstein, N.M. Osipenko // Physical mesomechanics. — 2015. — № 18(2). — P. 139–148.
9. Козин В.М. Исследование предельного состояния ледяного покрова в условиях чистого изгиба при усилении армирующими элементами / В.М. Козин, А.С. Васильев, В.Л. Земляк, К.И. Ипатов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2019. — № 61. — С. 61–69.
10. Ипатов К.И. Исследование влияния поверхностного армирования на несущую способность льда / К.И. Ипатов, А.С. Васильев, В.Л. Земляк // Вычислительная механика сплошных сред. — 2019. — Т. 12, № 1. — С. 98–105.
11. Козин В.М. Технология определения физико-механических свойств модельного льда / В.М. Козин, В.Л. Земляк, Н.О. Баурин, К.И. Ипатов // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. — 2016. — № 4(25). — С. 32–40.
12. Лавров В.В. Деформация и прочность льда. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 206 с.
13. Браун Дж.Х. Упругость и прочность морского льда // Лед и снег: пер. с англ. М.: Мир, 1966. С. 51–80.
14. Maattanen M. On the flexural strength of brackish water ice by in situ tests / M. Maattanen // Mar. Sci. Comuns / — 1976. — Vol. 2. — № 2. — P. 125–138.

**Zemlyak Vitaliy Leonidovich**

Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russia  
E-mail: vellkom@list.ru

**Vasilyev Alexey Sergeevich**

Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russia  
E-mail: vasil-grunt@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7783-0000>

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=896244](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=896244)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57203895897>

**Zhukov Dmitry Sergeevich**

Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russia  
E-mail: znuk\_offf@mail.ru

## **Determination of the stress-strain state of the ice cover with surface reinforcement under the influence of static and dynamic loads**

**Abstract.** In vast areas of Siberia, the Far North and the Far East, in marshy and wooded regions of the Russian Federation, in areas where there are often no bridges over numerous streams and rivers, and in other difficult terrain conditions, the main option for cargo transportation is transportation by winter roads and ice crossings. Often, winter roads are used to transport goods and equipment to oil and gas fields and fields where exploration activities are carried out. At the same time, in order to determine the bearing capacity of the ice cover at the crossings, in order to arrange and strengthen them, it is necessary to know the mechanical characteristics of the ice. An analysis of the experimental data shows that the maximum deflections and stresses in ice occur at load speeds close to critical ones. Therefore, the case of equality of the speed of motion to the critical one is calculated when solving problems of ice destruction during the movement of the load.

The aim of the work is to determine the physical and mechanical characteristics of the ice cover using model experiments and verify their correctness based on the analytical expressions of the model.

In the work, studies were carried out to determine the Young's modulus and bending strength for ice when reinforcing samples with steel reinforcement for various reinforcement schemes. A model has been developed for calculating deflections and stresses for ice reinforced with various reinforcement schemes, when a load moves along its surface. In model experiments, samples in the form of ice beams were used. Their physical and mechanical properties were determined using tests carried out on a special loading device. The destruction occurred under the action of pure bending. From model experiments, the reduced moduli of elasticity were calculated, the values of which were then substituted into the developed analytical model.

**Keywords:** ice crossing; ice beam; physical and mechanical characteristics; model experiment; numerical experiment; loading device; deflections; stress-strain state