

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

2021, №3, Том 13 / 2021, No 3, Vol 13 <https://esj.today/issue-3-2021.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/14NZVN321.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М. Моделирование поведения ледового основания на переправе при усилении в срединном сечении тонкостенными трубами из полимерных материалов // Вестник Евразийской науки, 2021 №3, <https://esj.today/PDF/14NZVN321.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**For citation:**

Zemlyak V.L., Vasilyev A.S., Kozin V.M. (2021). Modeling the behavior of the ice base at the crossing with reinforcement in the middle section by thin-walled pipes made of polymer materials. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 3(13). Available at: <https://esj.today/PDF/14NZVN321.pdf> (in Russian)

**УДК 69.03**

**ГРНТИ 67.07**

**Земляк Виталий Леонидович**

ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия  
Доцент  
Кандидат физико-математических наук  
E-mail: [vellkom@list.ru](mailto:vellkom@list.ru)

**Васильев Алексей Сергеевич**

ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия  
Доцент кафедры «Технических дисциплин»  
Кандидат технических наук  
E-mail: [Vasil-grunt@mail.ru](mailto: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>

**Козин Виктор Михайлович**

ФГБУН «Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения  
Российской академии наук», Комсомольск-на-Амуре, Россия  
Профессор  
Доктор технических наук  
E-mail: [vellkom@list.ru](mailto:vellkom@list.ru)

**Моделирование поведения ледового основания  
на переправе при усилении в срединном сечении  
тонкостенными трубами из полимерных материалов**

**Аннотация.** Устройство дорожных переправ на территории Арктического шельфа и районах крайнего Севера, а также реках Сибири и Дальнего Востока в зимний период – важная задача, выполнение которой позволяет значительно сократить ресурсы на логистику при перевозке грузов по поверхности льда.

В данной работе авторами исследовались композиционные материалы на основе льда, где в качестве армирующего материала выступали тонкостенные трубы из поливинилхлорида, помещаемые в середину сечения образцов. Испытывались два вида труб вентиляционные белые и оранжевые канализационные. При проведении нескольких серий модельных экспериментов несущая способность ледовых образцов, армированных данными трубами, показала приблизительно одинаковые результаты, поэтому осреднённые модельные эксперименты с

данными трубами было решено объединить в один итоговый результат. Механические характеристики льда вычислялись при раздавливании образцов ледовых призм фиксированной длины с типовыми размерами.

Целью исследования было определить влияние тонкостенных труб из поливинилхлорида на пластичность и несущую способность ледовых образцов при их усилении. Численное исследование выполнялось в ПК ANSYS. Лёд моделировался конечными элементами на основе модели прочности Willam-Warnke. Трубы моделировались объёмными конечными элементами, и представляли собой трёхмерные тонкостенные тела. Работоспособность модели подтверждалась путем сопоставления численных расчетов с данными модельных экспериментов.

Результаты испытаний показали, то при армировании трубой разрушение происходит более плавно, и деформации перед разрушением имеют большие значения. Однако, тонкостенные трубы SN2 и SN4 не привнесли существенного вклада в увеличение несущей способности, в отличие от образца SN8, который незначительно повысил несущую способность. Таким образом, усиление срединного сечения ледяных образцов тонкостенными трубами из ПВХ незначительно увеличили пластичность образцов, без явного увеличения несущей способности.

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

## Введение

На сегодняшний день в Арктике обнаружено более 60 крупных месторождений углеводородов, 43 из которых расположены в российском секторе. По оценкам специалистов, сейчас в регионе сосредоточено до 30 % мировых неразведанных запасов газа и 13 % – нефти. Суммарный объём извлекаемых ресурсов российской части Арктики оценивается в 106 млрд тонн. Однако, несмотря на огромные богатства Арктического шельфа при реализации проектов в этом регионе необходимо решение целого комплекса серьезных проблем в первую очередь экологического, экономического и транспортно-технологического плана. Особое внимание вызывают вопросы добычи и транспортировки полезных ископаемых. С учетом суровых климатических условий, короткого сезона открытой воды, постоянного присутствия льда, возникает необходимость создания специальных транспортных средств для перевозки полезных ископаемых и обеспечения снабжения, с помощью которых можно решать поставленные задачи [1]. Эксплуатация транспортных средств зачастую осуществляется по поверхности ледяного покрова, при этом не всегда есть возможность использовать лед, толщина которого бы (1 метр и более) обеспечивала безопасность для людей и техники.

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 [2]. В связи с этим весьма актуальной становится задача прогнозирования и улучшения пластичности и несущей способности льда в зависимости от его физико-механических свойств, от воздействия на него движущихся нагрузок. В данной работе выполняется усиление льда тонкостенными трубами из поливинилхлорида, и определяется степень их влияния на прочностные и пластические свойства композитного материала на основе льда. Разрушения льда от нормальных, наклонных и радиальных трещин исследовали в своих работах Kim H., Keune J.N. [3]; Lu Wenjun, Lubbad R. [4]; Renshaw C.E., Schulson E.M.,

Sigward S.J.G. [5]; Tippmann J.D., Kim H., Rhymer J.D. [6]; Goldstein R.V, Osipenko N.M [7]; Vasilyev A.S. [8].

A lot of works dedicated to the introduction of reinforcing elements in ice crossings. Yakimenko and Sirotiyuk [9–11] describes experimental research on the "surface reinforcement" of ice crossings by geosynthetic materials.

### 1. Трубы для усиления льда

На сегодняшний день, использование композиционных материалов с ледовой основой становится необходимостью. Это обусловлено рядом факторов: возможностью регулирования прочности и пластичности льда, жёсткости и плотности, а также технологическими особенностями исполнения. В данной работе ледяные образцы армировались полимерными материалами: канализационными оранжевыми трубами, а также вентиляционными белыми. У полимерных материалов есть некоторые преимущества: они сравнительно дешёвы, имеют высокую химическую устойчивость, не корродируют. Также они имеют небольшую плотность, а значит низкую массу, и следовательно, не уменьшают полезную нагрузку при усилении ледовой переправы. Канализационные трубы достаточно просто вморозить в лёд, в силу их плавучести. В работе авторами проверено, насколько полимерные тонкостенные трубы большого диаметра способны изменять механические свойства композитного материала на основе льда.

Существует два типа канализационных труб: серые и оранжевые. Основное отличие между ними – оранжевые трубы менее чувствительны к колебаниям температур, поэтому чаще применяются для прокладки наружных коммуникаций, в то время как серая труба – для прокладки внутренних. Данная работа посвящена усилению ледовых образцов полимерными материалами. Для усиления использовались трубы из поливинилхлорида, двух видов: гладкие канализационные оранжевые и гладкие белые вентиляционные. Трубы оранжевые из поливинилхлорида (ПВХ) предназначены наружной прокладки канализации. По восприятию механической нагрузки такие трубы подразделяются на три группы:

- SN2 – менее прочные, легкие, с толщиной стенки 2,3 мм, способные воспринимать до 2 кН;
- SN4 – средней прочности и легкости, толщиной от 2,5 мм до 12,3 мм способные воспринимать до 4 кН;
- SN8 – наиболее прочные, тяжелые, толщиной от 3,2 до 15,3 мм, способные воспринимать до 8 кН.

Трубы для воздуховодов белые, с толщиной стенки в 1,5 мм. Классифицируются по сопротивляемости давлению следующим образом: низкому – до 900 Па; среднему от 900 до 2000 Па; высокому – сверх 2000 Па.

Для данных экспериментов применялись трубы оранжевые канализационные и белые для воздуховодов, диаметром 160 мм, толщиной от 1,5 до 4 мм, способные воспринимать нагрузку до 2 кН.

Для труб под давлением величина продольного напряжения определяется следующим образом:

$$\sigma_m = \frac{\rho \cdot R}{2 \cdot \delta} \quad (1)$$

где  $p$  – давление в трубах (в данном случае давление, на которое эти трубы рассчитаны),  
 $R$  – радиус оболочки по средней линии,  $\delta$  – толщина оболочки.

$$\sigma_{m\_white\_pipe} = \frac{2 \cdot 0,08}{2 \cdot 0,0015} = 53,3 \text{ кПа}$$

$$\sigma_{m\_orange\_pipe} = \frac{2 \cdot 0,08}{2 \cdot 0,004} = 20 \text{ кПа}$$

Геометрические характеристики труб представлены на рисунке 1. Здесь заштрихованная часть представляет собой лёд, а чёрные элементы – сечения труб. На рисунке 1а представлено сечение, армированное лёгкой оранжевой канализационной трубой SN2. На рисунке 2 представлено сечение образца, усиленного белой трубой для воздухопроводов.

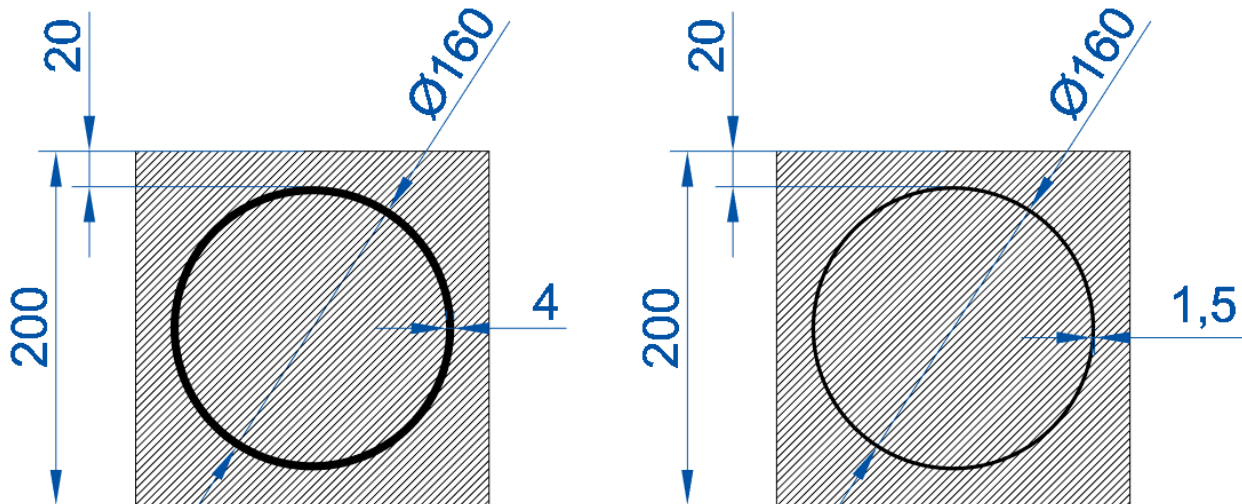


Рисунок 1. Сечения образцов (разработано автором)

Было разрушено по 10 образцов каждого вида, затем значения осреднялись и строилась диаграмма. Следует отметить, что явной разницы между результатами армирования образцов белой и оранжевой трубой обнаружено не было, поэтому данные результаты будут объединены в один.

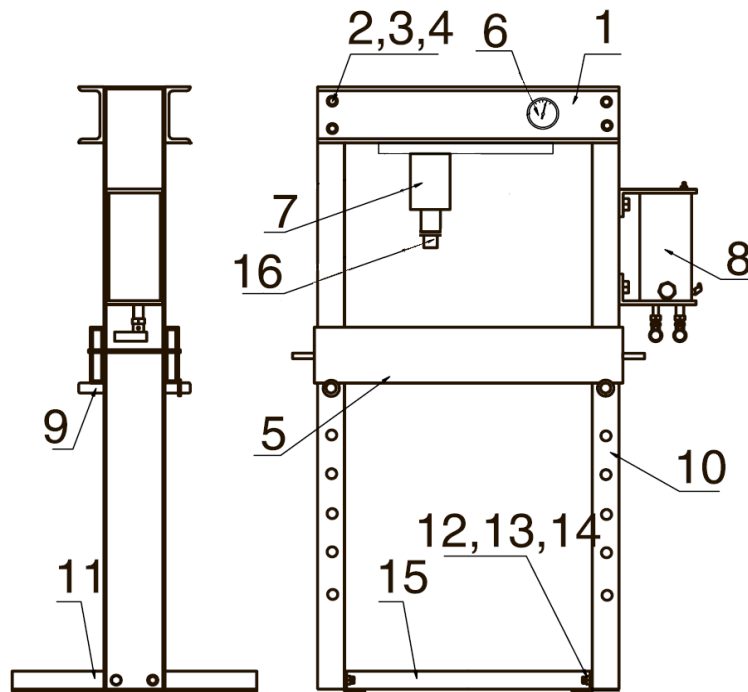
## 2. Методология проведения модельных экспериментов

Для выполнения модельных экспериментов по исследованию возможности повышения несущей способности ледяного покрова путем внедрения в него армирующих элементов была спроектирована и разработана универсальная установка.

Основу установки составил пневмогидравлический пресс (рис. 2) состоящий из стоек, станин, верхней и нижней балок и привода. Максимальное развиваемое усилие пресса равнялось 20 т. Номинальное давление 9 атм.

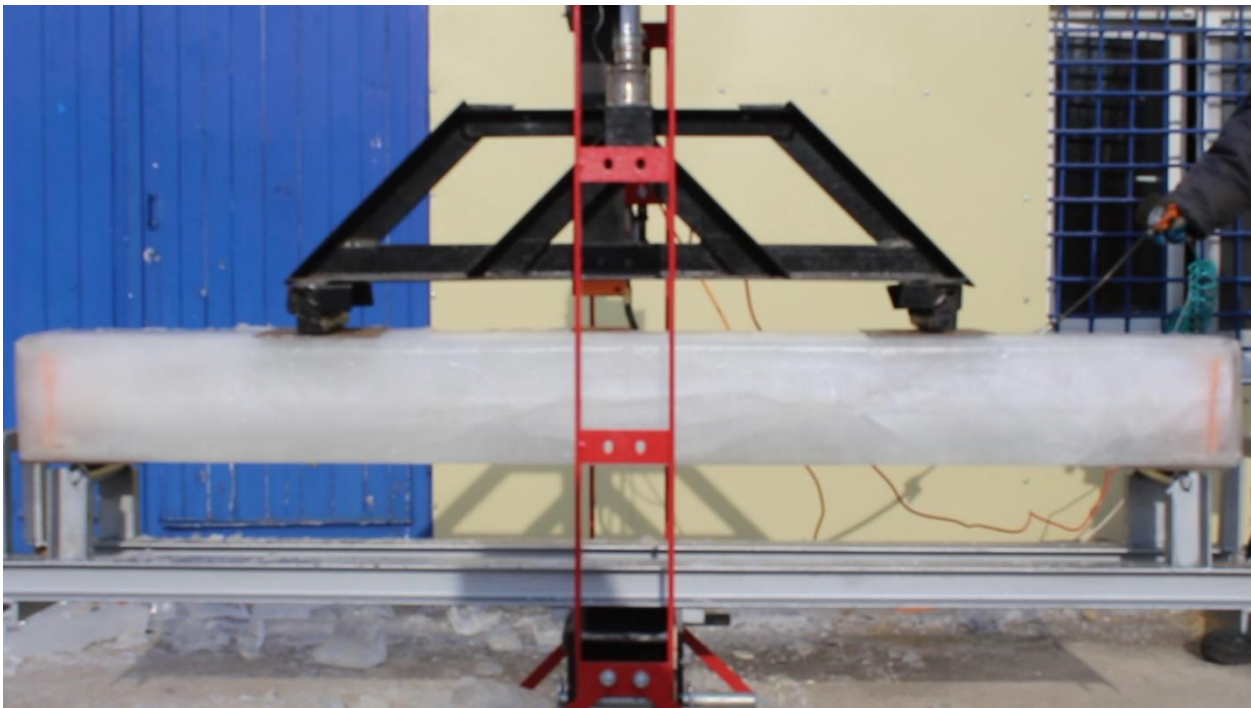
Стенки и дно опалубки выполнены из досок толщиной 40 мм. Боковые стенки 1 и дно соединены металлическими шпильками с наружной резьбой 2. Торцевые съемные стенки 3 закреплены с помощью стальных уголков 5 и болтов 4. Представленная опалубка позволяет заготавливать ледовые образцы размерами  $L \times V \times H = 2000 \times 200 \times 200$  мм.

В собранную опалубку закладывалась двухслойная полиэтиленовая плёнка, затем на заданных расстояниях от граней фиксировались тонкостенные трубы. После этого заливалась вода. 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 суток при температуре окружающей среды от -16 °C до -28 °C.



1 – верхняя балка; 2 – болт; 3 – шайба; 4 – гайка; 5 – рабочая платформа; 6 – манометр; 7 – гидроцилиндр; 8 – ручной гидронасос; 9 – регулировочный штырь; 10 – боковые стойки; 11 – опорный уголок; 12 – болт; 13 – шайба; 14 – гайка; 15 – распорка; 16 – шток

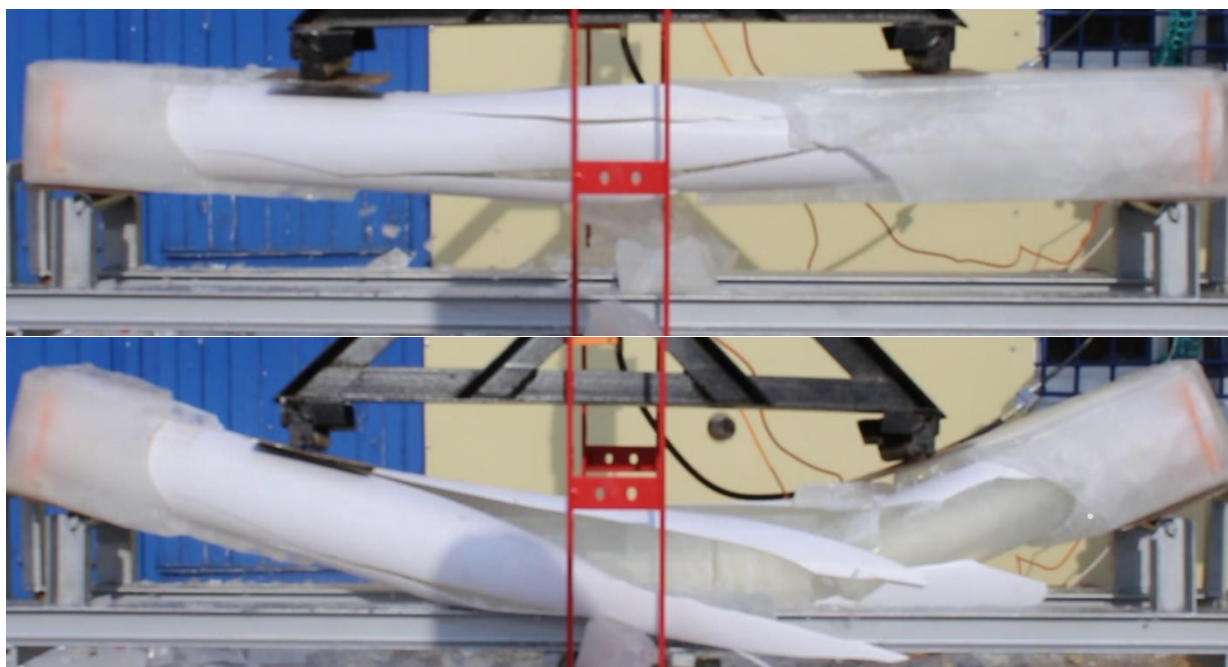
**Рисунок 2.** Пресс гидравлический (разработано автором)



**Рисунок 3.** Образец трубы на начальном этапе нагружения (разработано авторами / фото авторов)

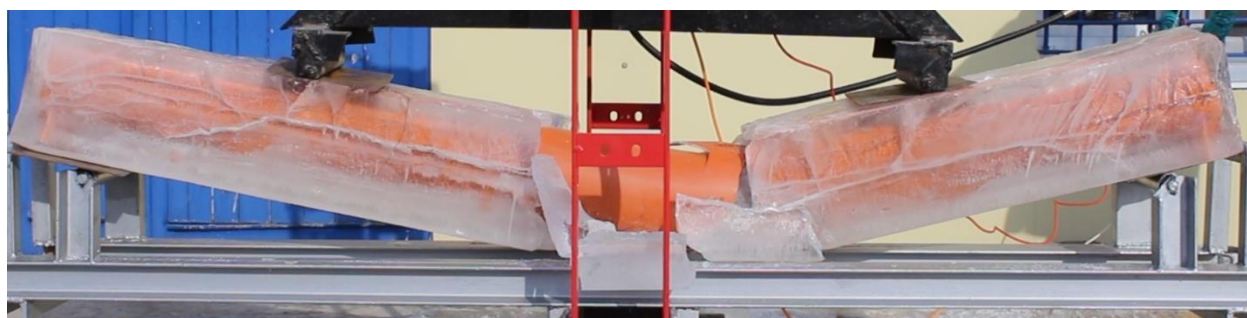
На рисунке 3 представлен образец белой трубы на начальных этапах нагружения. Участок балки между опорами распределительной балки находится в зоне чистого изгиба, где поперечные силы полностью отсутствуют.





*Рисунок 4. Разрушение образца с белой вентиляционной трубой (разработано авторами / фото авторов)*

На рисунке 4а,б представлен процесс разрушение белой вентиляционной трубы от продольных трещин, от радиальных напряжений.



*Рисунок 5. Разрушение образца с оранжевой трубой SN2 (разработано авторами / фото авторов)*

На рисунке 5 представлено разрушение образца с оранжевой трубой SN2. Разрушение происходит в середине пролёта от действия изгибающего момента, в зоне чистого изгиба.

### **3. Численная модель разрушения льда, усиленного пластиковыми тонкостенными трубами широкого диаметра**

Численное исследование выполнялось в ПК ANSYS. Лёд моделировался конечными элементами SOLID 65 на основе модели прочности Willam-Warnke. Трубы моделировались конечными элементами SOLID 185, и представляли собой трёхмерные тонкостенные тела. Работоспособность модели подтверждается путем сопоставления численного расчета с данными модельных экспериментов.

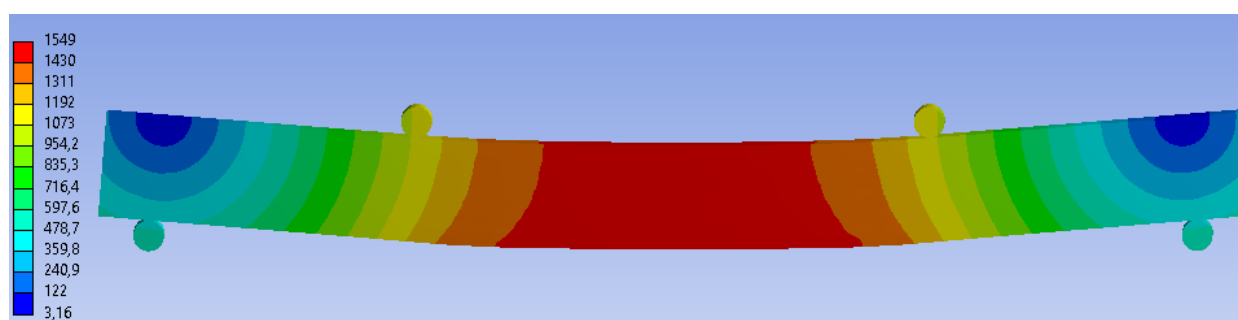
Соответствие временного шага и значения нагрузки при моделировании ледяных образцов.

Таблица 1

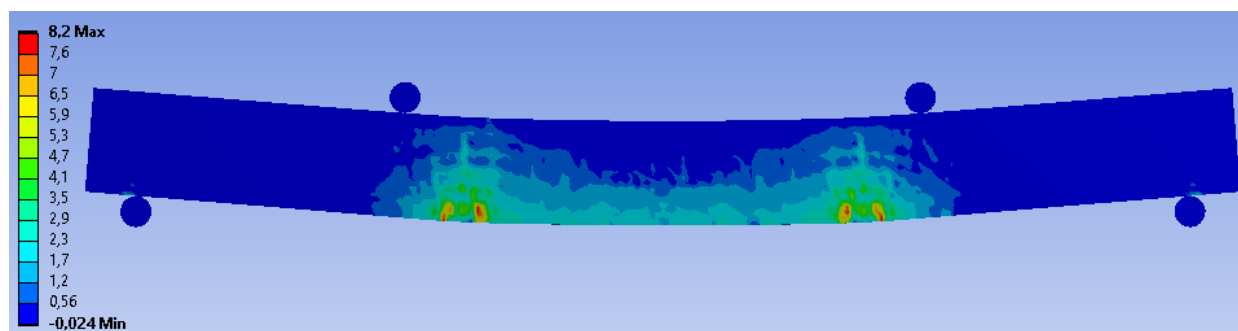
Соответствие нагрузки и временного шага

t нагруж., сек	m нагрузки, кг
0,0	0
0,6	32
0,9	37
1,2	42
1,4	117
1,6	120
1,8	125

Характеристики льда:  $E_{ice} = 0.5e3$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu_{ice} = 0.3$ , Прочность на сжатие  $R_{b_{ice}} = 0.25$  МПа, прочность на растяжение  $R_{bt_{ice}} = 0.2$  МПа. Характеристики пластиковых тонкостенных труб: модуль Юнга  $E_{pipe} = 2e3$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu_{pipe} = 0.4$ , предел прочности вычислялся по формуле (1) и для трубы SN2 составил  $R_{pipe} = 0.02$  МПа. Для труб SN4 и SN8 соответственно 0.04 и 0.08 МПа.



а



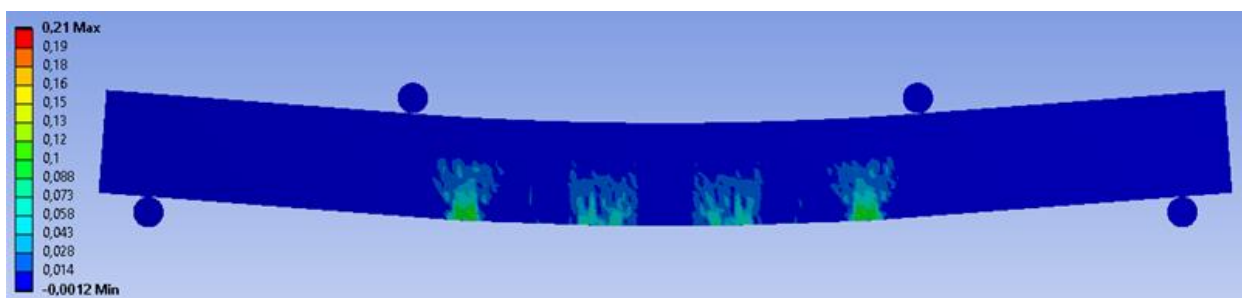
б

**Рисунок 6.** Визуализация результатов ANSYS:  
а – прогибы; б – схемы трещин (разработано авторами)

На рисунке 6а представлены изополя прогибов ледяной балки. При полном разрушении значения величин прогибов стремятся к бесконечности.

На рисунке 6б представлены величины прогибов согласно критерию Бажанта. Значения изополей превышающие 0, согласно данному критерию, соответствует разрушению и появлению трещин.

Из рисунка 7 видно, что в местах появления трещин во льду напряжения в трубе концентрируются, и достигают больших значений, чем в целом в области чистого изгиба между опорами.

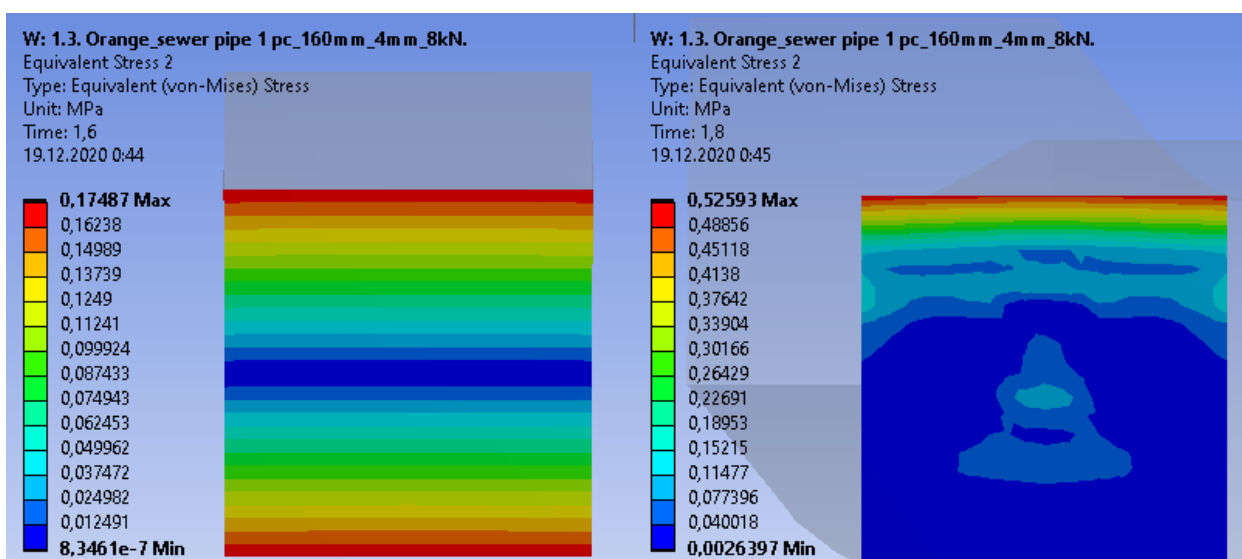


а



б

**Рисунок 7.** Результаты разрушения образца SN8: а – локальное появление трещин; б – нормальные напряжения в трубе (разработано авторами)

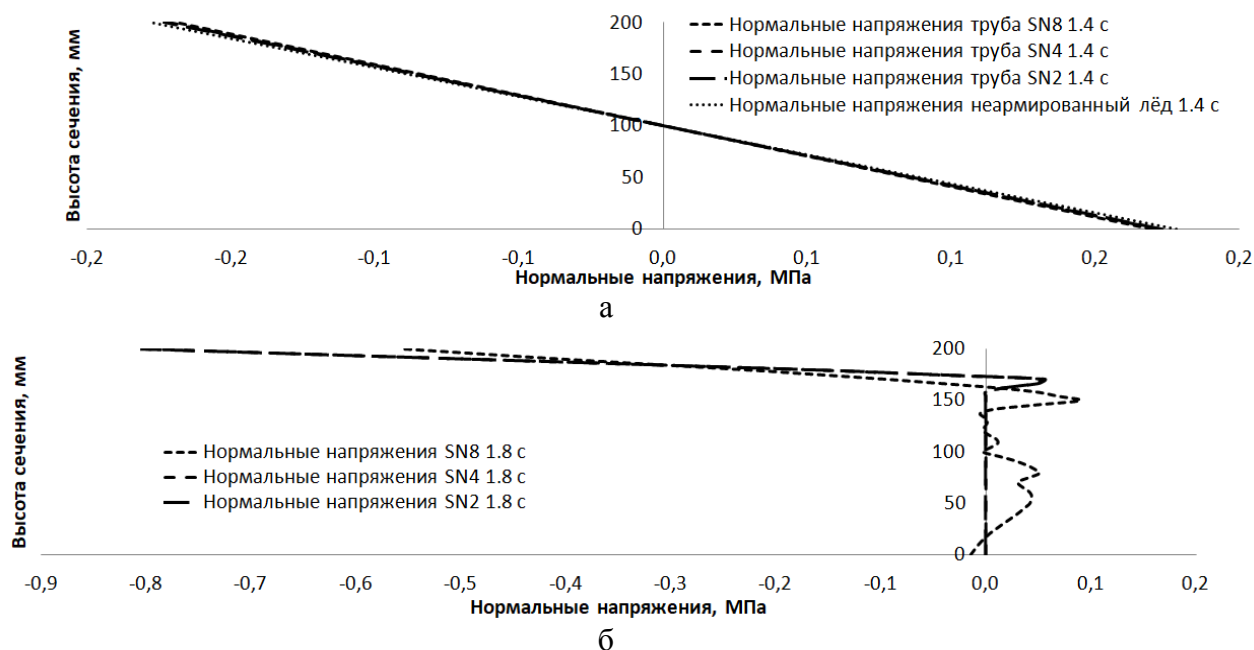


**Рисунок 8.** Распределения напряжения Мизеса в срединном сечении ледяной балки, усиленной трубой SN8: а – на этапе упругой работы материала до разрушения; б – при разрушении образца (разработано авторами)

На рисунке 8 представлены результаты напряжений Мизеса в срединном сечении образца ледяной балки SN8, на этапе упругой работы материала, а также при разрушении. Очевидно, что сечение разрушается со смещением нейтральной оси к верхней его части. На рисунке 9 представлены нормальные напряжения в сечениях образцов соответственно чистого льда, труб SN2, SN4, SN8.

Из рис. 9 и таблицы 2 видно, что образцы, усиленные тонкостенными трубами, выдерживают большее значение временного шага, следовательно несут большую нагрузку. Для ледяного образца без усиления видно резкое увеличение нормальных напряжений с 0,178 МПа на предыдущем шаге до 65 МПа на шаге 1.6 с., что соответствует резкому хрупкому разрушению.





**Рисунок 9.** Нормальные напряжения в срединном сечении испытываемых образцов: а – на шаге 1.4 с.; б – на шаге 1.8 с. (разработано авторами)

При этом очевидно, что образцы льда, усиленные более прочными трубами, имели меньшие напряжения в сжатой зоне на каждом шаге нагружения.

**Таблица 2**

**Значения максимальных нормальных напряжений в образцах**

		Временной шаг		
		1.4 с.	1.6 с.	1.8 с.
Норм. напр. в сжатой зоне, МПа	Образец с трубой SN8	-0,169	-0,175	-0,554
	Образец с трубой SN4	-0,172	-0,177	-0,801
	Образец с трубой SN2	- 0,173	-0,179	-0,804
	Образец не усиленный трубами	- 0,178	- 65	-

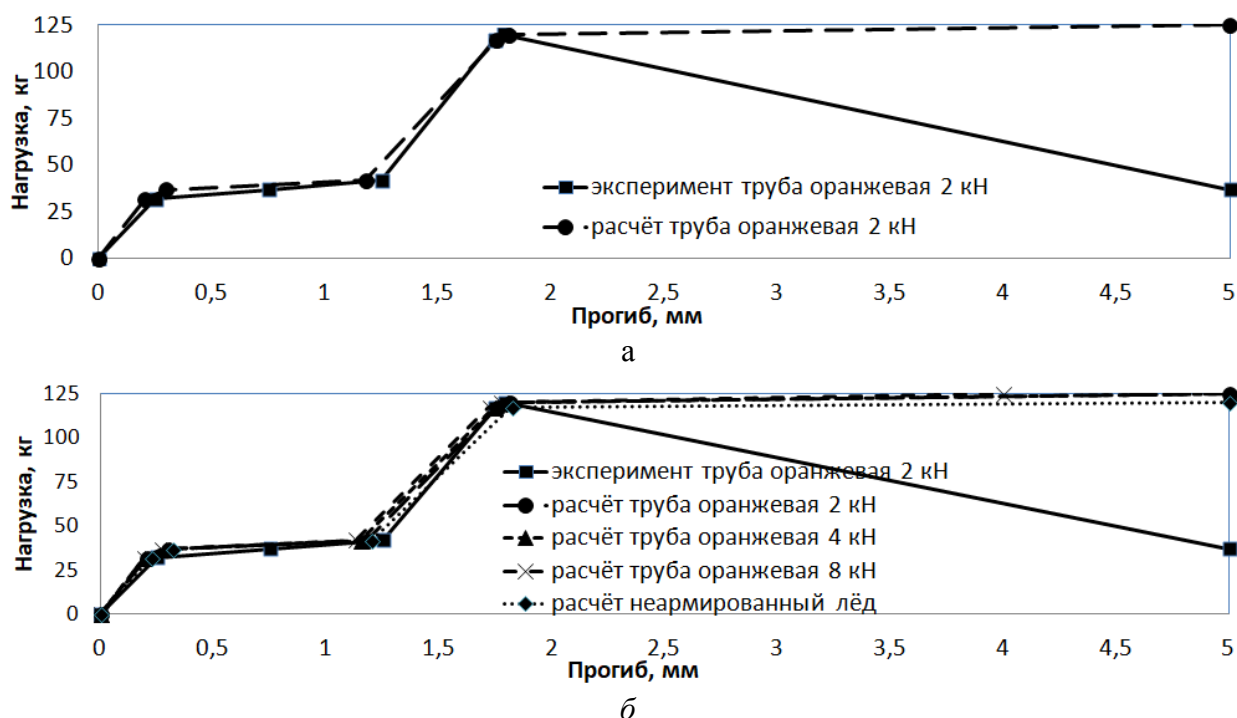
На рисунке 10 представлены результаты прогибов образцов с тонкостенными трубами различного класса. Из рисунка 10а видно, что наблюдается удовлетворительное совпадение данных расчёта и модельного эксперимента, что подтверждает работоспособность модели. Результаты прогиб эксперимента и расчёта при этом имеют погрешность около 1 %.

Результаты расчётов образцов при чистом изгибе в ПК ANSYS представлены в таблице 3. Как видно из таблицы, наибольший прогиб при наименьшей несущей способности имеет неармированный образец. Наибольшую же несущую способность закономерно показал образец, усиленный трубой SN8. Несущая способность данного образца на 6,8 % выше несущей способности ледяного образца без усиления.

**Таблица 3**

**Результаты исследования**

	Прогиб, мм	Разрушающая нагрузка, кг
Эксперимент SN2	1,79	120
Неармированный	1,82	117
Усиленный SN2	1,81	120
Усиленный SN4	1,80	120
Усиленный SN8	4	125



**Рисунок 10.** Результаты прогибов образцов: а – сопоставление данных эксперимента и расчёта; б – сопоставление расчётов неармированного образца, а также образцов, усиленных трубами различной прочности в ПК ANSYS (разработано авторами)

### Заключение

Расчёты показали, что пластиковая труба SN2 не привнесла значительного вклада в увеличение несущей способности или жёсткости образцов. При этом, наблюдается удовлетворительное совпадение расчётных и опытных данных при построении диаграмм нагрузка-прогиб при сопоставлении данных модельного эксперимента и расчёта для бразов усиленных SN2.

Результаты испытаний показали, что армирование трубами, при достаточных значениях прочности, могут увеличить как пластичность образцов, так и их несущую способность. Однако, тонкостенные трубы SN2 и SN4 не привнесли существенного вклада в увеличение несущей способности, в отличие от образца SN8, который повысил несущую способность порядка 7 %. Пластичность при этом возросла порядка 120 %. Таким образом, усиление срединного сечения ледяных образцов тонкостенными трубами из ПВХ способно увеличить как пластичность, так и несущую способность ледяных образцов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ипатов К.И., Исследование напряжённо-деформированного состояния ледяного покрова от воздействия на него движущейся нагрузки / Ипатов К.И., Земляк В.Л., Козин В.М., Васильев А.С. // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. – 2017. – №1 (26). – С. 103–113.
2. 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.
3. Kim H. Compressive strength of ice at impact strain rates / H. Kim, J.N. Keune // Journal of Materials / – 2007. – №42 (8). – P. 2802–2806.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Yakimenko O.V. Reinforcement of ice crossings / O.V. Yakimenko, V.V. Sirotyuk // Earth's Cryosphere. – 2014. – №18 (1). – P. 88–91.
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. Якименко О.В. Усиление ледовых переправ геосинтетическими материалами: монография / О.В. Якименко, В.В. Сиротюк. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2015. – 168 с.

**Zemlyak Vitaliy Leonidovich**

Sholom-Aleichem Priamursky state university, Biroidzhan, Russia  
E-mail: vellkom@list.ru

**Vasilyev Alexey Sergeevich**

Sholom-Aleichem Priamursky state university, Biroidzhan, Russia  
E-mail: Vasil-grunt@mail.ru

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

РИИЦ: [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>

**Kozin Victor Mihailovich**

Institute of mechanical engineering and metallurgy of the Far Eastern branch  
of the Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-na-Amure, Russia  
E-mail: vellkom@list.ru

## **Modeling the behavior of the ice base at the crossing with reinforcement in the middle section by thin-walled pipes made of polymer materials**

**Abstract.** Arrangement of road crossings on the territory of the Arctic shelf and the regions of the Far North, as well as the rivers of Siberia and the Far East in winter – the implementation of which can significantly reduce the resources for logistics when transporting goods on the ice surface. In this work, the authors investigated composite materials based on ice, where thin-walled polyvinyl chloride pipes, placed in the middle of the cross section of the samples, acted as a reinforcing material. Two types of ventilation pipes, white and orange, were tested. When carrying out several series of model experiments, the bearing capacity of ice samples reinforced with these pipes showed approximately the same results, therefore, it was decided to combine the averaged model experiments with these pipes into one final result. The mechanical characteristics of ice were calculated by crushing ice prism samples 60 cm long with a cross-sectional size of 15x15 cm.

Purpose: to determine the effect of thin-walled PVC pipes on the plasticity and bearing capacity of ice samples when reinforced. The numerical study was performed in the ANSYS PC. The ice was modeled with SOLID 65 finite elements based on the Willam-Warnke strength model. The pipes were modeled with SOLID 185 finite elements, and were three-dimensional thin-walled bodies. The performance of the model is confirmed by comparing the numerical calculations with the data of model experiments.

The test results showed that when reinforced with a pipe, destruction occurs more smoothly, and deformations before destruction are of great importance. However, thin-walled pipes SN2 and SN4 did not make a significant contribution to the increase in bearing capacity, in contrast to the sample SN8, which increased the bearing capacity by about 10 %. Thus, the reinforcement of the middle section of ice specimens with thin-walled PVC pipes slightly increased the ductility of the specimens, without an obvious increase in the bearing capacity.

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