

УДК 629.124.791.2.039

**Земляк В.Л.,**

к.ф.-м.н.,

Завідувач кафедри технічних дисциплін,

Приамурський державний університет імені Шолом-Алейхема

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ПАРНОЙ НАГРУЗКИ ПО ЛЕДЯНОМУ ПОКРОВУ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОЙ ВОДЫ**

*Анотація.* Проаналізовано вплив взаємного розташування двох рухомих навантажень на деформований стан крижаного покриву.

*Експерименти проводилися в опитовом льодовому басейні. Модель крижаного покриву готувалася шляхом наморазування льоду заданої товщини природним холодом. Масштаб моделювання  $\lambda_l=1-23$ . Товщина наморазуваного льоду становила  $h_m=3$  мм, що в перерахунку на натуру дорівнювало  $h_n=0.35$  м. Для проведення дослідів була спроектована і виготовлена необхідна оснастка і сформований вимірювальний комплекс для реєстрації коливань модельного льоду. У процесі буксирування моделі визначалася швидкість її руху, і записувалися профілі схвильованої поверхні льоду. За допомогою запропонованого критерію льодоруйнування виконана оцінка льодоруйнівної здатності генеруються згинально-гравітаційних хвиль. Виявлено безпечні режими руху парного навантаження (автотранспортних засобів). Визначено характер руйнування крижаного покриву.*

*Ключові слова:* лід, згинально-гравітаційні хвилі, парне навантаження, автотранспортний засіб.

**Земляк В.Л.,**

к.ф.-м.н.,

Заведующий кафедрой технических дисциплин,

Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ПАРНОЙ НАГРУЗКИ ПО ЛЕДЯНОМУ ПОКРОВУ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОЙ ВОДЫ**

*Аннотация.* Проанализировано влияние взаимного расположения двух движущихся нагрузок на деформированное состояние ледяного покрова.

*Эксперименты проводились в опытовом ледовом бассейне. Модель ледяного покрова приготавливалась путем наморазивания льда заданной толщины естественным холодом. Масштаб моделирования  $\lambda_l=1-23$ . Толщина наморазиваемого льда составляла  $h_m=3$  мм, что в пересчете на натуру равнялось  $h_n=0.35$  м. Для проведения опытов была спроектирована и изготовлена необходимая оснастка и сформирован измерительный комплекс для регистрации колебаний модельного льда. В процессе буксировки модели определялась скорость ее движения, и записывались профили взволнованной поверхности льда. С помощью предложенного критерия ледоразрушения выполнена оценка ледоразрушающей способности генерируемых изгибно-гравитационных волн. Вывявлены безопасные режимы движения парной нагрузки (автотранспортных средств). Определен характер разрушения ледяного покрова.*

*Ключевые слова:* лед, изгибно-гравитационные волны, парная нагрузка, автотранспортное средство.

**Zemlyak V.L.,**

candi. phys. and mathem. sci.,

head of the department of technical disciplines,

Sholom-Aleichem Priamursky State University

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF SAFE MODES OF DOUBLE LOAD MOTION ON THE ICE COVER IN DEEP WATER**

*Annotation. The impact of relative position of two moving loads on the strain state of the ice cover analyzed. Experiments were carried out in the ice basin. The model of ice cover was made by natural freezing on up to the required depth. Scale modeling was  $\lambda_l = 1-23$ . The thickness of the frozen ice was  $h_m = 3$  mm, which in conversion to full size was equal to  $h_n = 0.35$  m. The necessary equipment was designed and made for the experiments to be carried out and a measuring complex for registration of deflections of model ice was formed. By towing the model submarine vessels its velocity was determined and the profiles of deflections in the ice cover were registered. Using proposed criterion of ice destruction performed evaluation of ice breaking capacity of generated flexural-gravity waves. Safe modes of double load (vehicle) motion identified.*

*Key words: ice, flexural gravity waves, double load, vehicle.*

Работа выполнена в рамках проекта №487 задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания вузу №2014/422.

**Постановка проблемы.** В обширных районах Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока Российской Федерации сообщение с населенными пунктами часто затруднено и в летний период осуществляется с помощью авиации и речного флота, а в зимний с помощью автомобильных перевозок по ледяному покрову рек. Для этого сооружаются зимники и ледовые переправы. Однако главным минусом использования ледовых переправ является короткий срок их эксплуатации, не превышающий 3-4 месяца, т.к. ледовая переправа вводится в строй после достижения толщины речного льда порядка 1 метра. Известно, что перемещение нагрузки по ледяному покрову приводит к генерации изгибно-гравитационных волн, что может привести к частичному или полному разрушению льда [1]. Зная критическую (резонансную скорость) перемещения нагрузки, зависящей от толщины льда и конкретных ледовых условий, можно существенно продлить срок эксплуатации ледовых переправ, т.к. в этом случае не обязательно ожидать, когда ледяной покров достигнет необходимой толщины порядка 1 метра. В свою очередь знание физических процессов происходящих в системе лед-вода при парном движении нагрузки также может существенно продлить срок эксплуатации ледовых переправ.

**Анализ основных достижений.** На сегодняшний день существует большое количество работ, посвященных теоретическим исследованиям движения нагрузки по ледяному покрову [2,3]. Среди последних экспериментальных работ можно отметить работу [4], в которой

исследовано влияние снежного покрова на параметры генерируемых движущейся нагрузкой изгибно-гравитационных волн (ИГВ). Влияние подледных течений и глубины акватории на деформированное состояние льда от движения нагрузки проанализировано в работах [5,6]. В свою очередь модельные экспериментальные исследования подобного характера с использованием разрушаемой модели льда не проводились.

**Постановка задачи.** Целью работы являлось экспериментальное исследование минимальной несущей способности ледяного покрова при перемещении по нему одиночных автотранспортных средств (АТС), а также определение закономерностей процессов волнообразования при движении АТС в составе автоколонн.

*Подготовка к проведению модельных экспериментов.* Экспериментальные исследования проводились в опытовом ледовом бассейне лаборатории «Ледотехники» Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема (г. Биробиджан) [7].

Масштаб моделирования  $\lambda_l=1-23$  выбирался с учетом минимальной толщины льда намораживаемой в чаше бассейна, которая составляла  $h_m=3$  мм или  $h_n=0.35$  м после пересчета на натуру. Масса моделей варьировалась в диапазоне  $m_m=1.45-3.17$  кг, а скорость перемещения  $u_m=1.2-2.2$  м/с, что после пересчета на натуру составило от  $m_n=17.5-38.5$  т и  $u_n=20-38$  км/ч соответственно. Выбранные диапазоны соответствовали массе и скорости перемещения груженого автомобиля КАМАЗ различных марок. Для проведения экспериментов была спроектирована и изготовлена буксировочная система (рис.1).

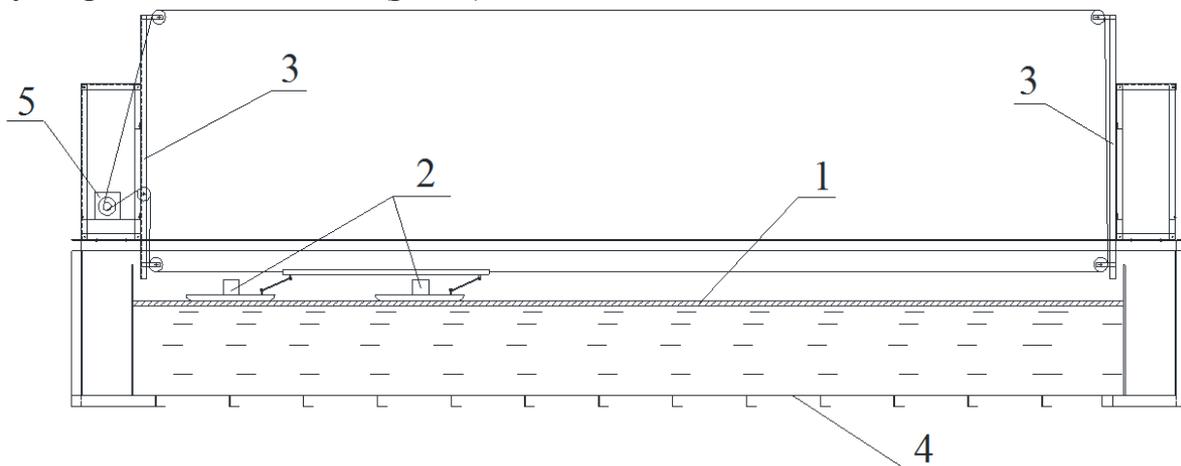


Рис.1 Схема опытового бассейна: 1 – поле модельного льда; 2 – модели нагрузки; 3 – стойки проводки буксировочного троса; 4 – чаша бассейна; 5 – сервопривод СПШ-20.

В процессе буксировки модели определялась скорость ее движения, и записывались профили взволнованной поверхности льда. Для записи колебаний модельного льда использовались бесконтактные лазерные

датчики LAS-Z компании WayCon (Германия). Профили ИГВ записывались с помощью программы Test.viewer 2.34.

Для оценки ледоразрушающей способности генерируемых нагрузкой изгибно-гравитационных использовался критерий ледоразрушения  $\alpha$ , который показывает отношение прогиба ИГВ к ее длине, т.е. характеризует кривизну генерируемых волн. Ранее экспериментально установлено, что если  $\alpha$  превышает 0.04, то происходит полное разрушение льда [8]:

$$\alpha = 2\pi\omega/\lambda$$

Моделирование естественного ледяного покрова может осуществляться с использованием различных моделей льда, для каждой из которых имеются соответствующие условия подобия. Обычно моделирование выполняют с частичным выполнением условий подобия [1]:

$$\lambda_E = \lambda_\omega = \lambda_h = \lambda_l,$$

где  $\lambda_E$  – масштаб моделирования по модулю Юнга;  $\lambda_\omega$  – масштаб моделирования по прогибам;  $\lambda_h$  – масштаб моделирования по толщине льда;  $\lambda_l$  – геометрический масштаб.

Требования условий подобия в отношении коэффициента Пуассона  $\nu$  и плотности  $\rho$  модельного льда также должны выполняться.

Модель нагрузки подобна натурному АТС, а их масса должна быть пропорциональна кубу модуля геометрического масштаба

$$D_n / D_m = \lambda_l^3,$$

где  $D_n$  – масса натурного АТС;  $D_m$  – масса модели АТС.

Скорость движения модели  $u_m$  определяется условием подобия

$$u_n / u_m = \lambda_l^{1/2},$$

где  $u_n$  – скорость движения натурного ПС.

Параметры модельных ИГВ следует пересчитывать на натуру согласно соотношениям для длины и прогиба льда

$$\lambda_n / \lambda_m = \omega_n / \omega_m = \lambda_l,$$

где  $\lambda_n$  – длина натуральных ИГВ;  $\lambda_m$  – длина модельных ИГВ;  $\omega_n$  – прогиб натурного льда;  $\omega_m$  – прогиб модельного льда.

Модель ледяного покрова приготавливалась в ледовом бассейне намораживанием естественного льда заданной толщины (3 мм) естественным холодом при температуре воздуха  $t = -(9-13)^\circ\text{C}$ . При использовании естественного льда в качестве модельного толщина моделируемого ледяного покрова будет пересчитываться на натуру по следующей зависимости:

$$h_n = h_m \lambda_l^{4/3} ([\sigma_u]_n / [\sigma_u]_m)^{-1/3}$$

где  $h_n$  – толщине натурного льда;  $h_m$  – толщине модельного льда  $\lambda_l$  – геометрический масштаб;  $[\sigma_u]_n$  – предел прочности натурного льда на изгиб;  $[\sigma_u]_m$  – предел прочности модельного льда на изгиб.

*Результаты модельных экспериментов.* Результаты экспериментов после пересчета на натуру показаны на рис. 2-4.

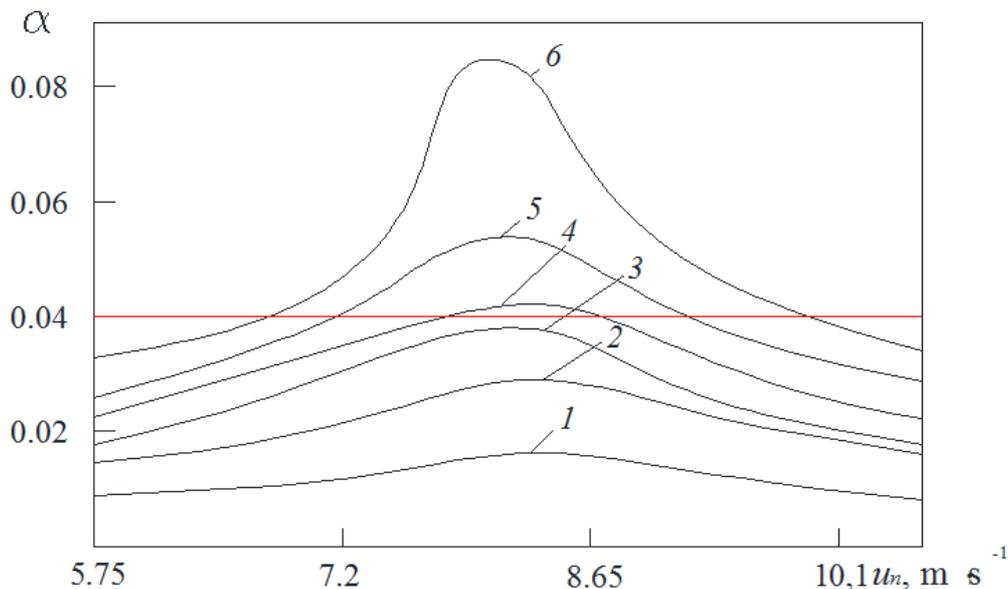


Рис. 2 Зависимость коэффициента  $\alpha$  от скорости перемещения нагрузки различной массы  $m_n$  после пересчета на натуру для льда толщиной 0.35 м: 1 –  $m_n = 1.76 \cdot 10^5$  кг; 2 –  $m_n = 2.45 \cdot 10^5$  кг; 3 –  $m_n = 2.75 \cdot 10^5$  кг; 4 –  $m_n = 3.15 \cdot 10^5$  кг; 5 –  $m_n = 3.55 \cdot 10^5$  кг; 6 –  $m_n = 3.86 \cdot 10^5$  кг.

На рис. 2 показана зависимость коэффициента  $\alpha$  от скорости перемещения нагрузки различной массы  $m_n$ . Из графиков можно сделать вывод, что ледяной покров толщиной не менее 0.35 м способен выдержать движущуюся нагрузку массой до 27.5 тонн. Дальнейшее увеличение массы нагрузки приводит к резкому увеличению ледоразрушающей способности ИГВ особенно при достижении критической (резонансной) скорости движения равной 8.15 м/с (30 км/ч).

Далее исследовалась возможность движения АТС в составе автоколонн, для этого моделировалось движение двух нагрузок кильватерным строем на различных расстояниях друг от друга с критической скоростью.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента  $\alpha$  от расстояния между автомобилями при движении автоколонны по льду толщиной 0.35 м с критической (резонансной) скоростью  $u_m = 8.15$  м/с. Из графиков видно, что наиболее опасно максимальное сближение автомобилей (движение грузовика с прицепом) и движение на расстоянии не менее 19 м друг от друга. В этих случаях в результате интерференционных процессов происходит наложение ИГВ от двух нагрузок и резкое возрастание их кривизны.

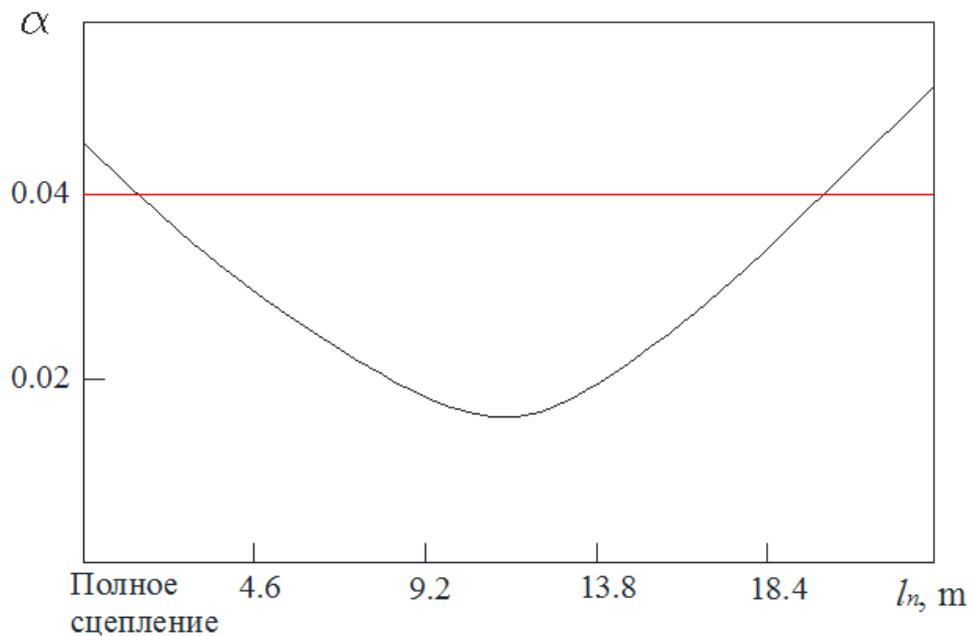


Рис. 3 Зависимость коэффициента  $\alpha$  от расстояния между АТС при движении по льду  $h_n=0.35$  м с критической скоростью  $u_n=8.15$  м/с.

Стоит отметить низкую степень разрушения модельного льда ИГВ. Сеть трещин наблюдалась лишь при полном сцеплении моделей, а также при максимальном расстоянии между нагрузками (рис. 4-5). Полная потеря несущей способности льда не наблюдалась.



Рис. 4 Характер разрушения модельного льда  $h_m=0.003$  м после прохождения моделей массой  $m_m=2.84$  кг кильватером при  $l_m=0.745$  с критической скоростью  $u_m=1.7$  м/с.



Рис. 5 Характер разрушения модельно льда  $h_m=0.003$  м после прохождении моделей массой  $m_m=2.84$  кг кильватером при  $l_m=0.94$  м с критической скоростью  $u_m=1.7$  м/с.

На последнем этапе исследования рассматривался случай движения нагрузок фронтом в зависимости от расстояния между ними (случай обгона одного автомобиля другим). На рис. 6 показана зависимость коэффициента  $\alpha$  от расстояния между АТС при движении фронтом по льду толщиной 0.35 м с критической скоростью  $u_n=8.15$  м/с после пересчета на натуру. С увеличением расстояния между моделями интенсивность разрушения падала. Однако во льду формировалась густая сеть трещин достаточно большой площади, т.е. повторные проходы могли бы привести к полному разрушению и потери несущей способности льда (рис. 7-8).

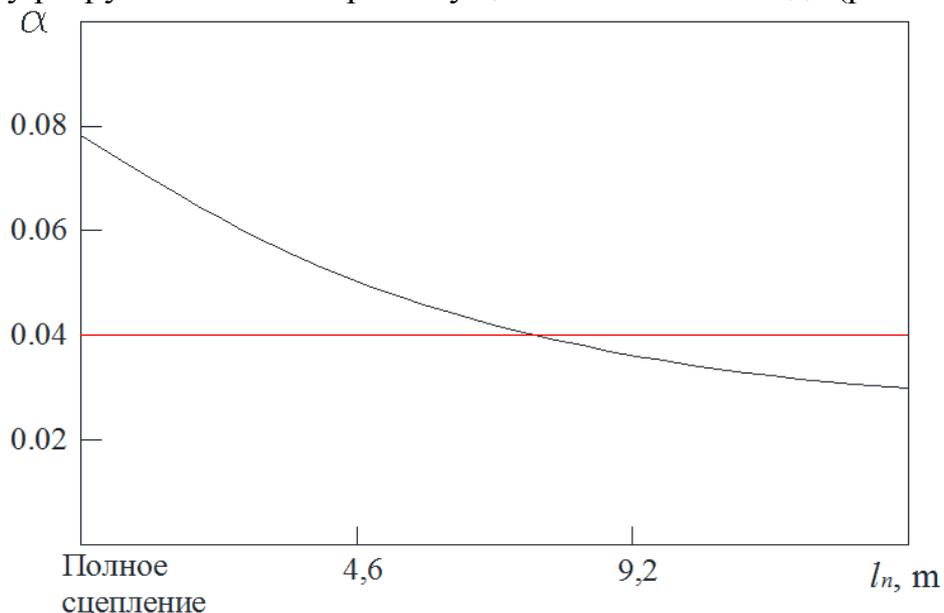


Рис. 6 Зависимость коэффициента  $\alpha$  от расстояния между АТС при движении фронтом по льду  $h_n=0.35$  м с критической скоростью  $u_n=8.15$  м/с.



Рис. 7 Характер разрушения модельно льда  $h_m=0.003$  м после прохождения моделей массой  $m_m=2.84$  кг при полном сцеплении с  $u_m=1.9$  м/с.



Рис. 8 Характер разрушения модельно льда  $h_m=0.003$  м после прохождения моделей СВІП массой  $m_m=2.84$  кг при расстоянии между ними 0.5 м с критической скоростью  $u_m=1.7$  м/с.

*Основные выводы.* Экспериментально установлено, что ледяной покров толщиной не менее 0.35 м может выдерживать на себе движущуюся нагрузку массой до 27.5 т. Скорость перемещения АТС по льду толщиной 0.35 м равная 8.15 м/с, чрезвычайно опасна и является критической (резонансной). Перемещение автомобилей в составе автоколонны может привести к опасным последствиям если автомашины идут на максимально близком расстоянии друг от друга, либо если расстояние между нагрузками составляет не менее 18.5 м. Движение автомобилей фронтом является наиболее опасным, поэтому обгон по

ледовой переправе следует осуществлять на скоростях выше критических и на максимально большом расстоянии между АТС. Полученные результаты показывают, что срок эксплуатации ледовых переправ можно существенно продлить за счет более раннего ввода их в строй, т.к. необходимость ожидания, когда ледяной покров намерзнет до достаточной толщины (около 1 метра) не обязательна.

***Использованные источники информации:***

1. Козин В. М. Физические основы разрушения ледяного покрова резонансным методом / В. М. Козин, В. Л. Земляк. - Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2013. - 249 с.
2. Squire V. A. Synergies between VLFS Hydroelasticity and Sea Ice Research / V. A. Squire // Int. Journal Offshore Polar Eng. - 2008. - Vol. 18. - No. 4. - P. 241–253.
3. Pogorelova A. V. Motion of a Load Over a Floating Sheet in a Variable-Depth Pool / A. V. Pogorelova, V. M. Kozin // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. - 2014. - Vol. 55. - No. 2. - P. 335-344.
4. Kozin V. M. Influence of Snow Cover on the Parameters Flexural-Gravity Waves in Ice Cover / V. M. Kozin, V. L. Zemlyak, V. Y. Vereshchagin // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. - 2013. - Vol. 54. - No. 3. - P. 458-464.
5. Земляк В. Л. Влияние подледного течения на параметры изгибно-гравитационных волн, возникающих от движения подводного судна под ледяным покровом / В. Л. Земляк, В. М. Козин, Г. В. Петросян // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. - 2014. - Т. 17. - № 4. - С. 17-28.
6. Земляк В. Л. Исследование возможности всплытия подводных судов в ледяном покрове при ограниченной глубине акватории / В. Л. Земляк, В. М. Козин, Г. В. Петросян // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. - 2013. - Т. 13. - № 2. - С. 51-65.
7. Земляк В. Л. Лаборатория “Ледотехники” / В. Л. Земляк, Д. А. Курбацкий, Н. О. Баурин // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. - 2013. - Т. 12. - № 1. - С. 75-84.
8. Козин В. М. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов / В. М. Козин, А. В. Онищук, Б. Н. Марьин. - Владивосток: Дальнаука, 2005. - 191 с.

***References:***

1. Kozin V.M., Zemlyak V.L. Physical Fundamentals of Ice Cover Destruction Resonance Method / Komsomolsk-on-Amur: Institute of Machining and Metallurgy FEB RAS, Sholom-Aleichem Priamursky State University. 2013. 249 p.
2. Squire V. A. Synergies between VLFS Hydroelasticity and Sea Ice Research / V. A. Squire // Int. Journal Offshore Polar Eng. - 2008. - Vol. 18. - No. 4. - P. 241–253.
3. Pogorelova A. V. Motion of a Load Over a Floating Sheet in a Variable-Depth Pool / A. V. Pogorelova, V. M. Kozin // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. - 2014. - Vol. 55. - No. 2. - P. 335-344.
4. Kozin V. M. Influence of Snow Cover on the Parameters Flexural-Gravity Waves in Ice Cover / V. M. Kozin, V. L. Zemlyak, V. Y. Vereshchagin // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. - 2013. - Vol. 54. - No. 3. - P. 458-464.
5. Zemlyak V. L. Impact of Underice Stream on the Parameters of Flexural-Gravity Waves Caused by the Motion of Submarine Vessel Under the Ice Cover / V. L. Zemlyak, V. M. Kozin, G. V. Petrosyan // Vestnik, Quart. J. of Amur State University after Sholom-Aleichem. - 2014. - Vol. 17. – No. 4. - P. 17-28.

6. Zemlyak V. L. Исследование возможности всплытия подводных судов в ледяном покрове при ограниченной глубине акватории / V. L. Zemlyak, V. M. Kozin, G. V. Petrosyan // Vestnik, Quart. J. of Amur State University after Sholom-Aleichem. - 2013. - Vol. 13. - No. 2. - P. 51-65.
7. Zemlyak V. L. Laboratory "Ice technology" / В. Л. Земляк, Д. А. Курбацкий, Н. О. Баурин // Vestnik, Quart. J. of Amur State University after Sholom-Aleichem. - 2013. - Vol. 12. - No. 1. - P. 75-84.
8. Kozin V. M. The Ice-Breaking Capacity of Flexural-Gravity Waves Produced by Motion of Objects / V. M. Kozin, A. G. Onishchuk, B. N. Mar'in,. - Dal'nauka, Vladivostok, 2005. - 191 pp.

Рецензент: Дубко В.О.