

УДК 539.42

DOI: 10.32326/1814-9146-2025-87-2-144-157

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА
НА БАЗЕ АНАЛОГОВЫХ СРЕДСТВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ
В ИЗУЧЕНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПРОНИКАНИЯ В ЛЕД***

© 2025 г.

**Калмыков А.П.^{1,2}, Герасимов С.И.^{1,2,3},
Капинос С.А.¹, Ерофеев В.И.²**

*¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Российская Федерация*

*²Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального
исследовательского центра «Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН», Нижний Новгород, Российская Федерация*

*³Саровский физико-технический институт – филиал Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
Саров, Российская Федерация*

apkalm@gmail.com, s.i.gerasimov@mail.ru, erof.vi@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.08.2024

С использованием аналогового оптико-рентгенографического комплекса, состоящего из переносной импульсной рентгеновской аппаратуры и электронно-оптической камеры, исследуются процессы внедрения высокоскоростных ударников, метаемых баллистическими установками, в сплошные прочные среды. Описано применение комплекса при проведении опытов по прониканию ударников в соленый и пресный лед со средней скоростью 1000 м/с. Для изготовления соленой ледовой преграды, используемой в опытах, применялась водопроводная вода, замораживаемая в климатической камере в специально спроектированном контейнере, и растворенная предварительно в горячей воде морская соль из расчета 190–210 г на объем воды ~23 л. Внедрение ударника осуществлялось по нормали к лицевой поверхности ледовой преграды, при этом длина измерительного участка во всех опытах была одна и та же. По полученным в эксперименте временам срабатывания датчиков в преграде определялась динамическая твердость и гидродинамический коэффициент сопротивления при помощи метода наименьших квадратов применительно к схеме движения в форме Понселе. Размеры образующейся во льду каверны определялись путем обмера (с учетом коэффициента увеличения 1,28–1,32) зафиксированной на рентгеновском снимке полости. Радиус каверны определялся как половина диаметра полости на фиксированном расстоянии. Выявлено, что размеры образующейся каверны в пресном и соленом льду при реализованных в опытах условиях внедрения с учетом погрешности измерений практически не зависят от температуры; в соленом льду каверна в среднем на 20% шире, чем в пресном.

* Выполнено при финансовой поддержке РФН (проект № 20-19-00613).

Ключевые слова: пресный и соленый лед, ударник, высокоскоростное проникание, визуализация, аналоговые средства.

Введение

Одно из важнейших геополитических и экономических значений для России имеет Арктика. Постоянство присутствия нашего государства в арктическом регионе обусловлено, прежде всего, задачами обороны страны и необходимостью отстаивания внешних границ континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане [1]. Вместе с тем Арктика является богатейшей ресурсной базой планеты, располагающей до 22% мировых неразведанных запасов углеводородов, более половины из которых принадлежит России [2]. Поэтому перспективы экономического роста Российской Федерации связаны в том числе с развитием единой Арктической транспортной системы (Северного морского пути как ее элемента) и освоением арктической сырьевой базы, а следовательно, зависят от интенсивности и эффективности освоения морей Северного Ледовитого океана и Дальнего Востока, расположенных в суровых природно-климатических условиях и характеризующихся наличием дрейфующего и неподвижного льда. Обеспечение безопасности государства и экономических интересов страны напрямую связано с проведением непрерывных комплексных научных исследований в этом стратегически важном регионе. Большие задачи стоят здесь и перед исследователями-механиками. Изучение ударного взаимодействия твердых деформируемых тел и конструкций с ледовыми преградами является актуальной проблемой, решение которой будет способствовать как повышению эффективности борьбы с ледовыми заторами [3] и защиты элементов летательных аппаратов от ледовых частиц (града) [4], так и укреплению сезонных ледовых переправ [5, 6]. Например, ледовая дорога на самый крупный остров Ольхон озера Байкал, имеющая протяженность 11 км, является частью автотрассы регионального значения (Иркутск–Усть-Ордынский–Баяндай–Еланцы–Хужир) и ежегодно функционирует с начала февраля до середины апреля [7].

Кроме того, в статье [8] показано, что посредством физического моделирования ледяного покрова Байкала возможно изучение сейсмопрогностических сценариев, во многом схожих с ситуациями прогноза тектонических землетрясений.

При использовании численных и аналитических методов для решения задач проникания [9–17] требуются адекватные математические модели поведения льда, которые основываются на знании основных физико-механических свойств ледовых сред: динамических диаграмм деформирования, кривых ударной сжимаемости, прочностных зависимостей, закономерностей, связывающих силы сопротивления внедрению со скоростью удара, формой головной части ударника и т.п. [18–21]. Поэтому большую роль в изучении динамического поведения ледовых сред играют экспериментальные исследования [4, 8, 19, 22–30].

В связи с этим для решения задач проникания твердых тел в лед требуется проведение широкого круга экспериментальных исследований физико-механических свойств и закономерностей процессов проникания, результаты которых необходимы для идентификации и верификации математических моделей динамического поведения льда. Это, в свою очередь, требует применения надежных эффективных методов регистрации, что в условиях высокоскоростного метания с использованием ствольных или взрывных технологий означает необходимость совершенствования или создания новых недорогих устройств аналоговой визуализации, позволяющих в условиях ин-

тенсивных нагрузок, осколочных полей, фоновых засветок сохранять работоспособность и получать необходимую информацию как на стадии подхода и внедрения в преграду (вылета из нее), так и при движении внутри в общем случае непрозрачной среды. После получения эффективного инструмента, используемого в прямой и обратной постановках опытов, для решения задач проникновения твердых тел в сплошные прочные среды требуется проведение широкого круга экспериментальных исследований физико-механических свойств, способов и закономерностей процессов проникновения, результаты которых необходимы для идентификации и верификации математических моделей динамического поведения изучаемых сред.

1. Аналоговый оптико-рентгеновский комплекс для изучения процессов внедрения высокоскоростных ударников в сплошные прочные среды

Для получения однократных фотографических изображений в отраженном или проходящем свете предложена и внедрена в практику эксперимента аналоговая электронно-оптическая камера ЭПОС, позволяющая проводить регистрацию с выдержкой ≈ 1 мкс (частота съемки до 10^6 кадров/с) [28–30].

На рис. 1 приведены характерные фотографии, полученные с использованием камеры ЭПОС в аэробаллистических, газодинамических испытаниях: *а)* цилиндрический ударник в задачах определения уравнения состояния; *б)* момент выхода объекта исследования из дульного выхлопа; *в)* отделение элементов поддона; *г)* касание песчаной преграды проникателем; *д), е)* подход проникателя к преграде и выход из нее.

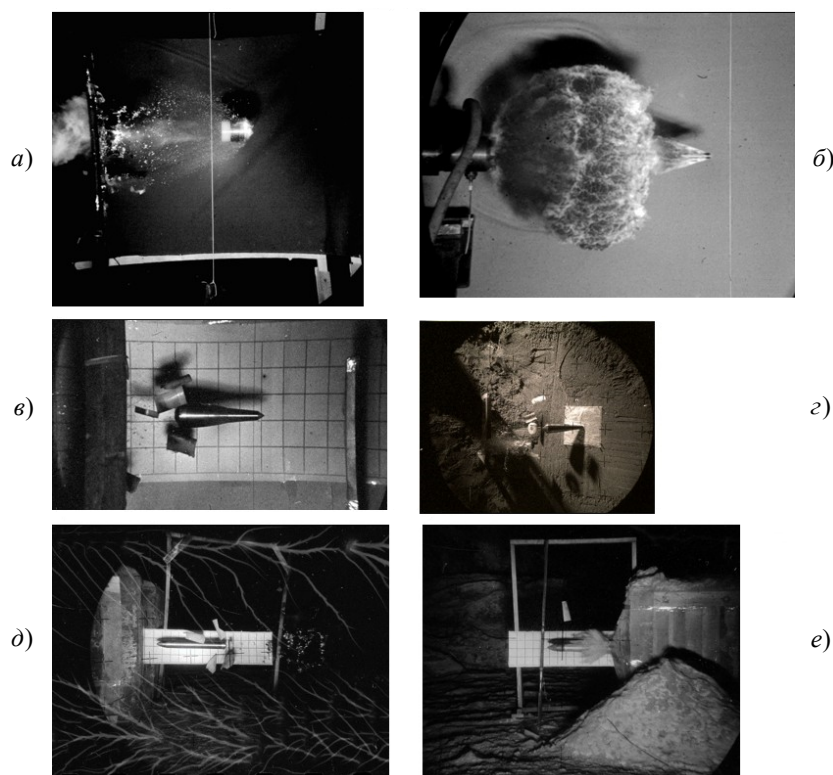


Рис. 1. Примеры изображений, получаемых с помощью камер ЭПОС в штатных опытах

Несмотря на непрозрачность большинства естественных грунтовых (пески, глины, доломиты, известняки и т.д.) и искусственных (бетоны различных марок) преград для оптических средств регистрации, использование рентгенографического метода в экспериментах дает возможность визуализации процесса проникания и является поэтому практически основным инструментом получения информации по термодинамическим параметрам, необходимой для проверки технических решений, а также тарировки инженерных и численных методик, используемых при проектировании таких конструкций.

Рентгеновская регистрация состояния внешних обводов и углового положения метаемого объекта (МО) по двум ортогональным направлениям (стереорентгенографирование) на заданном участке траектории полета после прохождения отсекаателя представлена на рис. 2, а на рис. 3 показана кинорентгенограмма состояния МО на подходе к преграде и в преграде (ящик с влажным песком шириной 100 мм).

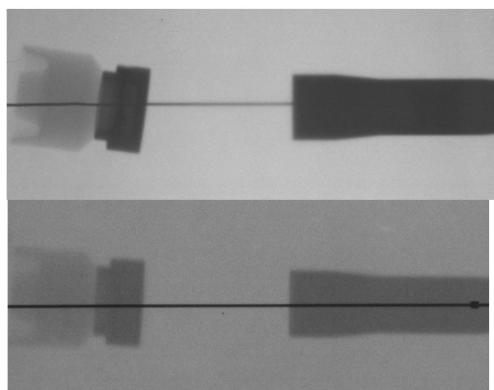


Рис. 2. Фотография с рентгенограммы в плоскости XOY (верхний снимок), фотография с рентгенограммы в плоскости XOZ (нижний снимок); скорость 400 м/с



Рис. 3. Кинорентгенограмма входа и движения МО в преграде

2. Проникание в лед

С использованием переносного рентгеновского аппарата проводились опыты по прониканию в соленый и пресный лед ударников М1 и М3 (рис. 4), метаемых из пороховой баллистической установки калибром 14,5 мм со средней начальной скоростью $V_0 = 1000$ м/с, $X_{цт}$ – расстояние от центра тяжести. Внедрение осуществлялось по нормали к лицевой поверхности преграды.

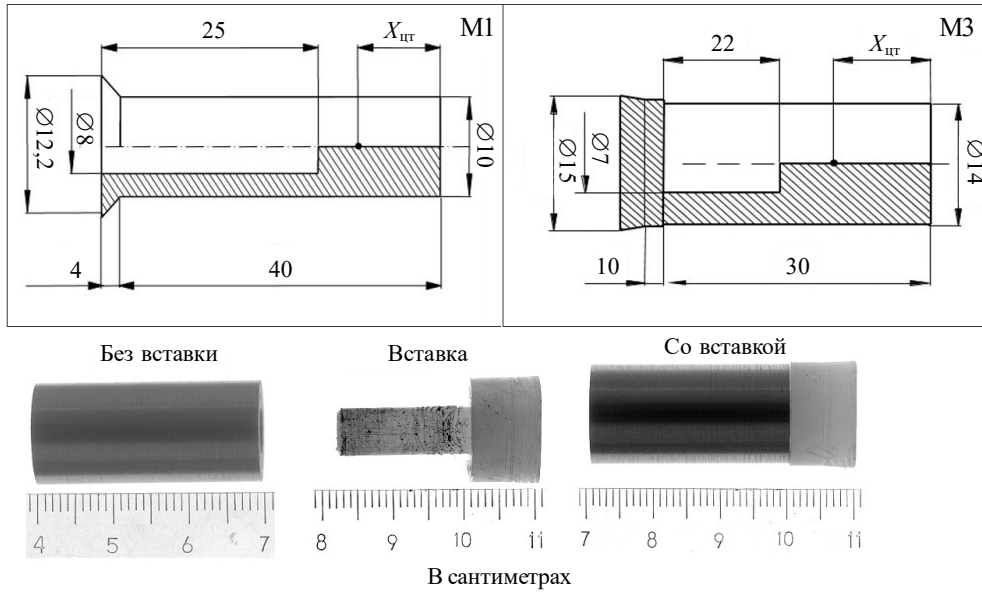


Рис. 4. Ударники М1 и М3; элементы М3

Ледовая преграда, используемая в опытах, имела размеры 300×170×450 мм. Для ее изготовления использовалась водопроводная вода, замораживаемая в климатической камере ИЛКА в специально спроектированном контейнере, и растворенная предварительно в горячей воде морская соль (ООО «Гринпром» ТУ РБ 04721802.001-97 «Соль морская природная» или ООО ПТК «Уралмедпром» ТУ 9318-001-46934452-97 «Морская соль») из расчета 190–210 г на объем воды ~23 л.

По полученным в эксперименте временам срабатывания датчиков в преграде (то есть по зависимостям глубины проникания h от времени) определяли динамическую твердость H_d и гидродинамический коэффициент сопротивления C при помощи метода наименьших квадратов применительно к схеме движения в форме Понселе [31]. В этой схеме уравнение движения записано в виде:

$$m \frac{dV}{dt} = -C \frac{\rho V^2}{2} S - H_d S, \quad (1)$$

где t – время, C и H_d – постоянные, m – масса ударника, S – площадь кавитатора, ρ – плотность среды, V – текущая скорость ударника.

Проинтегрировав (1), получим:

$$V(t) = V_0 \frac{1 - \sqrt{\varphi} \cdot \operatorname{tg} \Psi t}{1 + \operatorname{tg} \Psi t / \sqrt{\varphi}},$$

где

$$\Psi = \frac{S}{m} \sqrt{\frac{C \rho H_d}{2}}, \quad \varphi = \frac{2 H_d}{C \rho V_0^2}.$$

Проинтегрировав уравнение для $V(t)$ дважды, получим аппроксимационную глубину проникания:

$$h(t)_{\text{анп}} = \frac{2m}{SC\rho} \ln \left| \cos \Psi t + \frac{1}{\sqrt{\varphi}} \sin \Psi t \right|.$$

В безразмерном виде последняя формула примет вид:

$$\hat{h}(\hat{t})_{\text{апп}} = \frac{1}{C} \ln \left| \cos \left(\sqrt{\frac{2CH_{\text{д}}}{\rho V_0^2}} \hat{t} \right) + \frac{1}{\sqrt{\phi}} \sin \left(\sqrt{\frac{2CH_{\text{д}}}{\rho V_0^2}} \hat{t} \right) \right|,$$

где $\hat{h} = h / h^*$, $\hat{t} = t / t^*$, $h^* = 2m / (S\rho)$, $t^* = 2m / (S\rho V)$.

Полный коэффициент сопротивления с учетом прочности среды:

$$C_x = C + \frac{2H_{\text{д}}}{\rho V^2}. \quad (2)$$

Аппроксимация экспериментальных точек $h(t)$ и, соответственно, отыскание оптимальных постоянных C и $H_{\text{д}}$ проводились с помощью стандартной математической программы. Минимизировали функционал $Q(t, C, H_{\text{д}}) = \sum_{i=0}^n (h(t) - h(t)_{\text{апп}})^2$ с граничными условиями $C > 0$ и $H_{\text{д}} > 0$. Для нахождения минимума Q использовали встроенную функцию $\text{Minimize}(Q, C, H_{\text{д}})$, возвращающую C и $H_{\text{д}}$ такими, при которых функция $Q(t, C, H_{\text{д}})$ принимает минимальное значение.

На рис. 5 представлены зависимости динамической твердости от температуры для пресного и соленого льда, линией показана аппроксимация точек $H_{\text{д}}(T)$ функцией (методом наименьших квадратов):

$$H_{\text{д}}(T) = \frac{a}{T + b} + c.$$

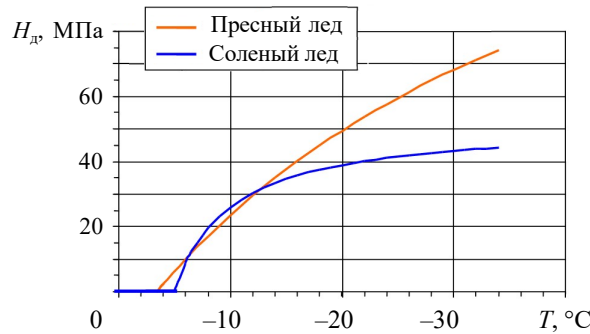


Рис. 5. Сравнение зависимостей $H_{\text{д}}(T)$ в пресном ($a = 8000 \text{ МПа} \cdot ^\circ\text{C}$, $b = -41 \text{ } ^\circ\text{C}$, $c = 181 \text{ МПа}$) и соленом льду ($a = 260 \text{ МПа} \cdot ^\circ\text{C}$, $b = 0$, $c = 52 \text{ МПа}$)

Видно, что $H_{\text{д}}$ растет с падением температуры в пресном и в соленом льду. Также видно, что при низких температурах (ниже $-12 \text{ } ^\circ\text{C}$) пресный лед значительно прочнее соленого.

Следует подчеркнуть, что все приведенные в статье параметры получены в предположении независимости их от скорости в диапазоне начальных скоростей $V_0 \approx \approx 900\text{--}1100 \text{ м/с}$, при этом длина измерительного участка зависимости $h(t)$ во всех опытах была одна и та же.

Полный коэффициент сопротивления представим в зависимости от скорости в пресном и соленом льду. Функция $C_x(V)$ показана выше (см. (2)). Исходя из полученных зависимостей $C(T)$ и $H_{\text{д}}(T)$ можно построить функцию $C_x(V, T)$:

$$C_x(V, T) = \lambda T + \mu + \frac{2 \cdot 10^6 [a + c(T + b)]}{\rho V^2 (T + b)}, \quad (3)$$

где λ, μ – коэффициенты линейной аппроксимации зависимостей $C(T)$, значения которых приведены на рис. 6 для пресного и соленого льда. Значения коэффициентов a, b, c для зависимости $H_d(T)$ указаны в подписи к рис. 5.

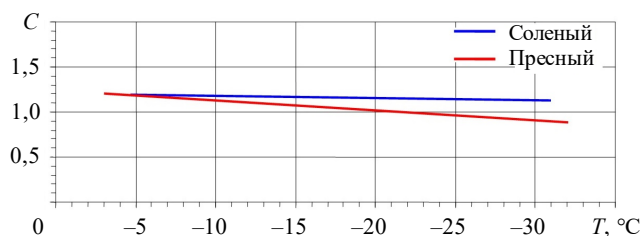


Рис. 6. Сравнение зависимостей $C(T)$ в пресном ($C(T) = 0,011T + 1,2416$) и соленом ($C(T) = 0,0022 \cdot T + 1,1989$) льду

На рис. 7 отражена зависимость $C_x(V, T)$ для пресного и соленого льда соответственно при температурах, лежащих в диапазоне $-32^\circ\text{C} < T \leq -5^\circ\text{C}$. Наименьшая скорость на графиках примерно соответствует скорости ударника на выходе из ледовой преграды.

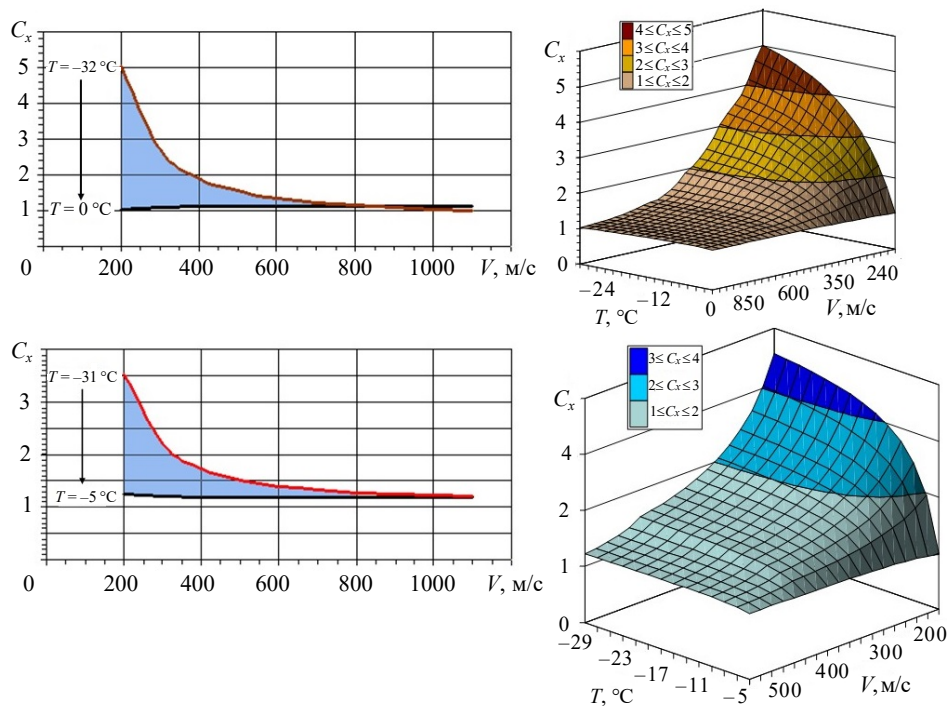


Рис. 7. Зависимость $C_x(V, T)$ для пресного льда (вверху) и соленого льда (внизу)

3. Каверны, образующиеся при движении ударников в пресных и соленых льдах

Размеры образующейся во льду каверны определялись путем обмера (с учетом коэффициента увеличения K_y , равного 1,28–1,32) зафиксированной полости на рентгеновском снимке. Радиус каверны определялся как половина диаметра полости на фиксированном расстоянии. На рис. 8 показаны профили каверн, полученные при

проведении экспериментов в координатах $\hat{r} = r/r_k - 1$ – ось ординат и $\hat{h} = h/r_k$ – ось абсцисс ($r(t)$ – график раскрытия каверны, r_k – радиус кавитатора).

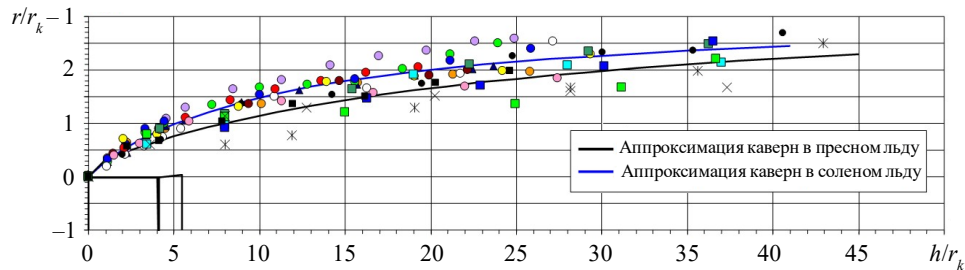


Рис. 8. Профили каверн в пресном и соленом льду

Каверны аппроксимировали методом наименьших квадратов уравнением вида $\hat{r}(\hat{h}) = k - m/(\hat{h} + n)$ со среднеквадратичной погрешностью $\tilde{\sigma}$:

$\hat{r}(\hat{h}) = 3,41 - 77,4/(\hat{h} + 24,1)$ – черная линия, каверна в пресном льду, $\tilde{\sigma} = 0,237$;

$\hat{r}(\hat{h}) = 3,6 - 60,7/(\hat{h} + 18)$ – синяя линия, каверна в соленом льду, $\tilde{\sigma} = 0,17$.

Типовая рентгенограмма движения ударника во льду представлена на рис. 9.

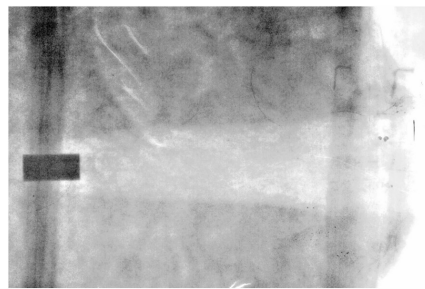


Рис. 9. Рентгенограмма движения ударника во льду (движение справа налево)

Заключение

Размеры образующейся каверны в пресном и соленом льду при реализованных в опытах условиях внедрения с учетом погрешности измерений практически не зависят от температуры; в соленом льду каверна в среднем на 20% шире, чем в пресном.

Кроме описанного в статье ударного воздействия, важно исследовать воздействие на ледяной покров высокоскоростных движущихся нагрузок. Обратим внимание на статью [32], посвященную исследованию напряженно-деформированного состояния ледяного покрова при взлете и посадке на него самолета, а также на статьи [33, 34] по расчету деформаций и волнового давления при движении нагрузки по ледяному покрову и наличию течения со сдвигом скорости.

Список литературы

1. *Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты*. Под ред. Н.А. Махутова. М.: Знание, 2018. 1018 с.
2. Швец Н.Н., Береснева П.В. Нефтегазовые ресурсы Арктики: правовой статус, оценка запасов и экономическая целесообразность их разработки. *Вестник МГИМО-университета*. 2014. №4 (37). С. 60–67.
3. Нигметов Г.М., Пчелкин В.И., Филатов Ю.А. Ледовые заторы на реках Российской

Федерации. Пути и способы борьбы с ними. *Технологии гражданской безопасности*. 2003. №1-2. С. 74–80.

4. Баландин В.В., Брагов А.М., Ломунов А.К. Экспериментальное исследование механики ударного взаимодействия ледяного цилиндра с титановой пластиной. *Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Матер. XXIX Международ. симпозиума им. А.Г. Горикова*. Москва, 15–19 мая 2023 г. М.: МАИ, 2023. Т. 1. С. 50–52.

5. ГОСТ Р 58948-2020. Национальный стандарт Российской Федерации «Дороги автомобильные общего пользования. Дороги автомобильные зимние и ледовые переправы. Технические правила устройства и содержания». Разработан ФАУ «РОСДОРНИИ» Министерства транспорта РФ. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 августа 2020 г. № 468-ст. М.: Стандартинформ, 2020. 52 с.

6. Ипатов К.И., Козин В.М., Земляк В.Л. Влияние схемы армирования на несущую способность ледовых переправ. *Полярная механика*. 2016. №3. С. 258–267.

7. Князева М. Рассказываем, когда откроется ледовая переправа на Ольхон 2024. *Комсомольская правда*. 25 января 2024.

8. Dobretsov N.L., Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Chernykh E.N., Shilko E.V., Levina E.A., Ponomareva E.A. Advance in earthquake prediction by physical simulation on the baikal ice cover. *Physical Mesomechanics*. 2013. Vol. 16. No 1. P. 52–61. DOI: 10.1134/S1029959913010062.

9. Афанасьев В.П., Смирнов В.Н. Методика расчета полномасштабной прочности льда. *Актуальные проблемы современной науки*. 2010. №6. С. 245–248.

10. Sherburn J.A., Horstemeyer M.F. Hydrodynamic modeling of impact craters in ice. *International Journal of Impact Engineering*. 2010. Vol. 37. No 1. P. 27–36. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.07.001.

11. Горельский В.А., Коняев А.А., Толкачев В.Ф. Моделирование глубины проникания ударников в пресный лед при температуре до -25°C . *Полярная механика*. 2012. №1. С. 21–22.

12. Глазырин В.П., Орлов Ю.Н. Моделирование процесса импульсного нагружения ледовой пластины. *Полярная механика*. 2016. №3. С. 162–169.

13. Погорелова А.В., Козин В.М., Матюшина А.А., Гончарик А.О. Ледяной покров переменной толщины, подверженный ударной нагрузке. *Полярная механика*. 2016. №3. С. 93–103.

14. Orlov M., Orlova Y., Bogomolov G., Glazirin V. Research of the behavior of ice on water under explosive loads. *Journal of Physics: Conference Series*. 6th International Conference Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics, CICMCM-2016. Tomsk, 16–18 Nov. 2016. Tomsk, Russian Federation. 2017. Article No 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/919/1/012006.

15. Баландин В.В., Крылов С.В., Повереннов Е.Ю., Садовский В.В. Численное моделирование ударного взаимодействия упругого цилиндра со льдом. *Проблемы прочности и пластичности*. 2017. Т. 79. № 1. С. 93–103. DOI: 10.32326/1814-9146-2017-79-1-93-103.

16. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н. Исследование поведения льда при ударных и взрывных нагрузках. *Полярная механика. Сб. докл. VI Всеросс. науч.-практич. конф. с Международ. участием*. Нижний Новгород, 23-24 марта 2023 г. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2023. С. 169–173.

17. Фазылов Т.В., Орлов М.Ю., Глазырин В.П. Численное моделирование процесса разрушения конструкций, содержащих лед и стальные пластины. *Наука. Промышленность. Оборона: Труды XXV Всероссийской научно-практической конференции*. Новосибирск, 17–19 апр. 2024 г. В 4-х т. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2024, Т. 2. С. 98–104.

18. Carney K.S., Benson D.J., Dubois P., Lee R. A phenomenological high strain rate model with failure for ice. *International Journal of Solids and Structures*. 2006. Vol. 43. Iss. 25-26. P. 7820–7839. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.04.005.

19. Sain T., Narasimhan R. Constitutive modeling of ice in the high strain rate regime. *International Journal of Solids and Structures*. 2011. Vol. 48. Iss. 5. P. 817–827. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.11.016.

20. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Механика разрушения льда и некоторые ее приложения. *Вестник Новосибирского государственного университета. Сер. Математика, Механика, Информатика*. 2012. Т. 12. №4. С. 41–47.
21. Ravindra D., Waisman H. A temperature dependent creep damage model for polycrystalline ice. *Mechanics of Materials*. 2012. Vol. 46. P. 23–41. DOI: 10.1016/j.mechmat.2011.11.007.
22. Asp L.E., Juntikka R. High velocity impact on NCF reinforced composites. *Composites Science and Technology*. 2009. Vol. 69. Iss. 9. P. 1478–1482. DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.05.027.
23. Combescure A., Chuzel-Marmot Y., Fabis J. Experimental study of high-velocity impact and fracture of ice. *International Journal of Solids and Structures*. 2011. Vol. 48. Iss. 20. P. 2779–2790. DOI: 10.1016/J.IJSOLSTR.2011.05.028.
24. Wells J., Jordaan I., Derradji-Aouat A., Taylor R. Small-scale laboratory experiments on the indentation failure of polycrystalline ice in compression: Main results and pressure distribution. *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 65. P. 314–325. DOI: 10.1016/J.COLDREGIONS.2010.11.002.
25. Баландин В.В., Брагов А.М., Глазова Е.Г., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Крылов С.В. Численно-экспериментальное исследование процессов ударного нагружения льда. *Полярная механика*. 2016. №3. С. 294–303.
26. Kraus E.I., Melnikov A.Y., Fomin V.M., Shabalin I.I. Penetration of steel projectiles through finite-thickness ice targets. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019. Vol. 60. No 3. P. 526–532. DOI: 10.1134/S0021894419030155.
27. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Разрушение льда при ударных и взрывных нагрузках. Численное моделирование. Эксперимент. *Труды Томского государственного университета. Серия «Физико-математическая». Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики: VIII Всеросс. молодежная конф.* Под ред. М.Ю. Орлова. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2019. С. 9–23.
28. Герасимов С.И., Одзериho И.А., Герасимова Р.В., Сальников А.В., Калмыков А.П., Яненко Б.А. Безопасные условия проведения исследований с баллистическими установками. *Изв. вузов. Машиностроение*. 2019. №9 (714). С. 105–114. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-9-105-114.
29. Герасимов С.И., Зубанков А.В., Кривошеев О.В. и др. Исследование пробития ледовой преграды цилиндрическим ударником. *Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ*. 2020. Т. 9. №2. С. 95–99. DOI: 10.1134/S2304487X20020042.
30. Gerasimov S.I., Zubankov A.V., Kalmykov A.P., Kapinos S.A., Kosyak E.G., Kuznetsov P.G. Experimental study of impactor motion in salt ice. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2020. Vol. 61. Iss. 4. P. 546–549. DOI: 10.1134/S0021894420040070.
31. Сагомоян А.Я. *Проникание*. М.: Изд-во Московского ун-та, 2014. 298 с.
32. Pogorelova A.V., Kozin V.M., Matyushina A.A. Stress-strain state of ice cover during aircraft takeoff and landing. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2015. Vol. 56. No 5. P. 920–926. DOI: 10.1134/S002189441505020X.
33. Tkacheva L.A. Deformations and wave forces in the motion of a load on an ice cover in the presence of a current with velocity shear. *Fluid Dynamics*. 2023. Vol. 58. No 6. P. 1025–1032. DOI: 10.1134/S0015462823602279.
34. Tkacheva L.A. Motion of a load on an ice cover in the presence of a liquid layer with shear current. *Fluid Dynamics*. 2024. Vol. 59. No 1. P. 98–110. DOI: 10.1134/S0015462823602954.

References

1. *Bezopasnost Rossii. Pravovye, sotsialno-ekonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty* [Security of Russia. Legal, Socio-Economic and Scientific-Technical Aspects]. Ed. N.A. Makhutov. Moscow. Znanie Publ. 2018. 1018 p. (In Russian).
2. Shvets N.N., Beresneva P.V. *Neftgazovye resursy Arktiki: pravovoy status, otsenka zapasov i ekonomicheskaya tselesoobraznost ikh razrabotki* [Oil and gas resources of the

Arctic: legal status, assessment of reserves and economic feasibility of their development]. *Vestnik MGIMO universiteta* [MGIMO Review of International Relations]. 2014. No 4 (37). P. 60–67 (In Russian).

3. Nigmatov G.M., Pchelkin V.I., Filatov Yu.A. Ledovye zatory na rekakh Rossiyskoy Federatsii. Puti i sposoby borby s nimi [Ice jams on the rivers of the Russian Federation. Ways and methods of dealing with them]. *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti* [Civil Security Technologies]. 2003. No 1-2. P. 74–80 (In Russian).

4. Balandin V.V., Bragov A.M., Lomunov A.K. Eksperimentalnoe issledovanie mekhaniki udarnogo vzaimodeystviya ledyanogo tsilindra s titanovoy plastinoy [Experimental study of the mechanics of impact interaction between an ice cylinder and a titanium plate]. *Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktiv i sploshnykh sred: Materialy XXIX Mezhdunarodnogo simpoziuma im. A.G. Gorshkova* [Dynamic and Technological Problems of Mechanics of Structures and Continuous Media. Materials of the XXIX International Symposium n.a. A.G. Gorshkov]. Moscow, 15–19 May 2023. Moscow. 2023. Vol. 1. P. 50–52 (In Russian).

5. GOST R 58948-2020. Natsionalnyy standart Rossiyskoy Federatsii “Dorogi avtomobilnye obshchego polzovaniya. Dorogi avtomobilnye zimnie i ledovye perepravy. Tekhnicheskie pravila ustroystva i soderzhaniya” [National standard of the Russian Federation “Automobile roads of general use. Winter Automobile Roads and Ice Crossing. Technical Rules for Construction and Maintenance”]. Razrabotan FAU “ROSDORNII” Ministerstva transporta RF. Utverzhden i vveden v deystvie Prikazom Federalnogo agentstva po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii ot 5 avgusta 2020 g. № 468-st [Developed by FAU “ROSDORNII” of the Ministry of Transport of the Russian Federation. Approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated August 5, 2020 No. 468-st]. Moscow. Standartinform Publ. 2020. 52 p. (In Russian).

6. Ipatov K.I., Kozin V.M., Zemlyak V.L. Vliyanie skhemy armirovaniya na nesushchuyu sposobnost ledovykh pereprav [The influence of reinforcement design on the bearing capacity of ice bridges]. *Polyarnaya mekhanika* [Polar Mechanics]. 2016. No 3. P. 258–267. (In Russian).

7. Knyazeva M. Rasskazyvaem, kogda otkroetsya ledovaya pereprava na Olkhon 2024 [We'll tell you when the ice crossing to Olkhon will open 2024]. *Komsomolskaya pravda*. 25 Jan. 2024 (In Russian).

8. Dobretsov N.L., Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Chernykh E.N., Shilko E.V., Levina E.A., Ponomareva E.A. Advance in earthquake prediction by physical simulation on the baikal ice cover. *Phys. Mesomech.* 2013. Vol. 16. No 1. P. 52–61. DOI: 10.1134/S1029959913010062.

9. Afanasyev V.P., Smirnov V.N. Metodika rascheta polnomasshtabnoy prochnosti lda. [Methodology for calculating full-scale ice strength]. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki* [Current Problems of Modern Science]. 2010. No 6. P. 245–248 (In Russian).

10. Sherburn J.A., Horstemeyer M.F. Hydrodynamic modeling of impact craters in ice. *Int. J. Impact Eng.* 2010. Vol. 37. No 1. P. 27–36. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.07.001.

11. Gorelskiy V.A., Konyaev A.A., Tolkachev V.F. Modelirovanie glubiny pronikaniya udarnikov v presnyy led pri temperature do –25 °C [Modeling the penetration depth of impactors into fresh ice at temperatures down to –25 °C]. *Polyarnaya mekhanika* [Polar Mechanics]. 2012. No 1. P. 21–22 (In Russian).

12. Glazyrin V.P., Orlov Yu.N. Modelirovanie protsessa impulsnogo nagruzheniya ledovoy plastiny [Modelling of process impulse ice loading plate]. *Polyarnaya mekhanika* [Polar Mechanics]. 2016. No 3. P. 162–169 (In Russian).

13. Pogorelova A.V., Kozin V.M., Matiushina A.A., Goncharik A.O. Ledianoy pokrov perezmennoy tolshchiny, podverzhennyy udarnoy nagruzke [Ice plate of variable thickness subjected to impulse load]. *Polyarnaya mekhanika* [Polar Mechanics]. 2016. No 3. P. 93–103 (In Russian).

14. Orlov M., Orlova Y., Bogomolov G., Glazirin V. Research of the behavior of ice on water under explosive loads. *Journal of Physics: Conference Series*. 6th International Conference Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics, CICMCM-2016. Tomsk, 16–18 Nov. 2016. Tomsk. Russian Federation. 2017. Article No 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/919/1/012006.

15. Balandin V.V., Krylov S.V., Poverennov E.Yu., Sadovskiy V.V. Chislennoe modelirovanie

udarnogo vzaimodeystviya uprugogo tsilindra so ldom [Numerical modeling of shock interaction of elastic cylinder with ice]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2017. Vol. 79. No 1. P. 93–103 (In Russian).

16. Glazyrin V.P., Orlov M.Yu., Orlova Yu.N. Issledovanie povedeniya lda pri udarnykh i vzryvnykh nagruzkakh [Study of ice behavior under shock and explosive loads]. *Polyarnaya mekhanika. Sb. dokladov VI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Polar Mechanics. Collection of Reports of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation]. Nizhny Novgorod, 23–24 March 2023. Nizhny Novgorod. NSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. P. 169–173 (In Russian).

17. Fazylov T.V., Orlov M.Yu., Glazyrin V.P. Chislennoe modelirovanie protsessa razrusheniya konstruktsiy, soderzhashchikh led i stalnye plastiny [Numerical modeling of the process of destruction of structures containing ice and steel plates]. *Nauka. Promyshlennost. Oborona: Trudy XXV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Science. Industry. Defense. Proceedings of the XXV All-Russian Scientific and Practical Conference]. Novosibirsk, 17–19 Apr. 2024. In 4 Vols. Novosibirsk. NGTU Publ. 2024. Vol. 2. P. 98–104 (In Russian).

18. Carney K.S., Benson D.J., Dubois P., Lee R. A phenomenological high strain rate model with failure for ice. *Int. J. Solids Struct.* 2006. Vol. 43. Iss. 25–26. P. 7820–7839. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.04.005.

19. Sain T., Narasimhan R. Constitutive modeling of ice in the high strain rate regime. *Int. J. Solids Struct.* 2011. Vol. 48. Iss. 5. P. 817–827. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.11.016.

20. Goldshteyn R.V., Osipenko N.M. Mekhanika razrusheniya lda i nekotorye ee prilozheniya [Fracture mechanics of ice and some its applications]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Matematika, Mekhanika, Informatika* [Bulletin of Novosibirsk State University. Ser.: Mathematics. Mechanics. Computer Science]. 2012. Vol. 12. No 4. P. 41–47 (In Russian).

21. Ravindra D., Waisman H. A temperature dependent creep damage model for polycrystalline ice. *Mechanics of Materials*. 2012. Vol. 46. P. 23–41. DOI: 10.1016/j.mechmat.2011.11.007.

22. Asp L.E., Juntikka R. High velocity impact on NCF reinforced composites. *Compos. Sci. Technol.* 2009. Vol. 69. Iss. 9. P. 1478–1482. DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.05.027.

23. Combescure A., Chuzel-Marmot Y., Fabis J. Experimental study of high-velocity impact and fracture of ice. *Int. J. Solids Struct.* 2011. Vol. 48. Iss. 20. P. 2779–2790. DOI: 10.1016/J.IJSOLSTR.2011.05.028.

24. Wells J., Jordaan I., Derradji-Aouat A., Taylor R. Small-scale laboratory experiments on the indentation failure of polycrystalline ice in compression: Main results and pressure distribution. *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 65. P. 314–325. DOI: 10.1016/J.COLDREGIONS.2010.11.002.

25. Balandin V.V., Bragov A.M., Glazova E.G., Konstantinov A.Yu., Kochetkov A.V., Krylov S.V. Chislenno-eksperimentalnoe issledovanie protsessov udarnogo nagruzheniya lda [Numerical and experimental investigation of processes of impact loading of ice]. *Polyarnaya mekhanika* [Polar Mechanics]. 2016. No 3. P. 294–303 (In Russian).

26. Kraus E.I., Melnikov A.Y., Fomin V.M., Shabalin I.I. Penetration of steel projectiles through finite-thickness ice targets. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019. Vol. 60. No 3. P. 526–532. DOI: 10.1134/S0021894419030155.

27. Glazyrin V.P., Orlov M.Yu., Orlova Yu.N. Razrushenie lda pri udarnykh i vzryvnykh nagruzkakh. Chislennoe modelirovanie. Eksperiment. *Trudy Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Fiziko-matematicheskaya". Aktualnye problemy sovremennoy mekhaniki sploshnykh sred i nebesnoy mekhaniki: VIII Vserossiyskaya molodezhnaya konferentsiya* [Proceedings of Tomsk State University. Series "Physics and Mathematics". Special issue: "Current problems of modern continuum mechanics and celestial mechanics"]. Ed. M.Yu. Orlov. Tomsk University Publ. 2019. P. 9–23 (In Russian).

28. Gerasimov S.I., Odzerikho I.A., Gerasimova R.V., Salnikov A.V., Kalmykov A.P., Yanenko B.A. Bezopasnye usloviya provedeniya issledovaniy s ballisticheskimi ustanovkami [Safe conditions for conducting research with ballistic installations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2019. No 9 (714). P. 105–114 (In Russian).

29. Gerasimov S.I., Zubankov A.V., Krivosheev O.V. et al. Issledovanie probitiya ledovoy pregrady tsilindricheskim udarnikom [Study of the penetration of a cylindrical striker through an ice barrier]. *Vestnik Natsionalnogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta MIFI* [Bulletin of the National Research Nuclear University MEPhI]. 2020. Vol. 9. No 2. P. 95–99 (In Russian).
30. Gerasimov S.I., Zubankov A.V., Kalmykov A.P., Kapinos S.A., Kosyak E.G., Kuznetsov P.G. Experimental study of impactor motion in salt ice. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2020. Vol. 61. Iss. 4. P. 546–549. DOI: 10.1134/S0021894420040070.
31. Sagomonyan A.Ya. *Pronikanie* [Penetration] Moscow. Moscow University Publishing House. 2014. 298 p. (In Russian).
32. Pogorelova A.V., Kozin V.M., Matyushina A.A. Stress-strain state of ice cover during aircraft takeoff and landing. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2015. Vol. 56. No 5. P. 920–926. DOI: 10.1134/S002189441505020X.
33. Tkacheva L.A. Deformations and wave forces in the motion of a load on an ice cover in the presence of a current with velocity shear. *Fluid Dynamics*. 2023. Vol. 58. No 6. P. 1025–1032. DOI: 10.1134/S0015462823602279.
34. Tkacheva L.A. Motion of a load on an ice cover in the presence of a liquid layer with shear current. *Fluid Dynamics*. 2024. Vol. 59. No 1. P. 98–110. DOI: 10.1134/S0015462823602954.

IMPROVING AN INTEGRATED APPROACH BASED ON ANALOG VISUALIZATION TOOLS IN STUDYING HIGH-SPEED PENETRATION INTO ICE*

Kalmykov A.P.^{1,2}, Gerasimov S.I.^{1,2,3}, Kapinos S.A.¹, Erofeev V.I.²

¹*Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute
of Experimental Physics, Sarov, Russian Federation*

²*Mechanical Engineering Research Institute of the RAS – Branch of Federal Research
Center “A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the RAS”,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

³*Sarov Physics and Technical Institute of National Research Nuclear University MEPhI,
Sarov, Russian Federation*

apkalm@gmail.com, s.i.gerasimov@mail.ru, erof.vi@yandex.ru

Received by the Editor 2024/08/20

An analog optical-radiographic complex is presented, consisting of portable pulsed X-ray equipment and an electron-optical camera, designed to study the processes of penetration of high-speed strikers thrown by ballistic installations into solid media. The use of the complex when conducting experiments on the penetration of impactors into salt and fresh ice with an average speed of 1000 m/s is described. To produce the salted ice barrier (SIP) used in the experiments, tap water was used, frozen in a climate chamber in a specially designed container and sea salt pre-dissolved in hot water at the rate of 190–210 grams per volume of water (~23 liters) used for receiving SIP. The impactor was introduced normal to the front surface of the target, and the length of the measuring section was the same in all experiments. Based on the experimental response times of the sensors in the ice obstacle, the dynamic hardness and hydrodynamic drag coefficient were determined using the least squares method in relation to the Poncelet-shaped motion pattern. The dimensions of the cavity formed in the ice were determined by measuring (taking into account a magnification factor of 1.28–1.32) the cavity

*Carried out with financial support from the Russian Science Foundation (project No 20-19-00613).

recorded on the *X*-ray image. The cavity radius was defined as half the cavity diameter at a fixed distance. It was revealed that the dimensions of the resulting cavity in fresh and salt ice under the implementation conditions implemented in the experiments, practically, taking into account the measurement error, do not depend on temperature; in salt ice, the cavity is, on average, 20% wider than in fresh ice.

Keywords: fresh and salt ice, impactor, high-speed penetration, visualization, analog tools.