

Из истории естествознания

From the History of Science

DOI: 10.31857/S020596060024503-5

ПЕРВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЛЬДА В РОССИИ ДЛЯ НУЖД ЛЕДОКОЛОСТРОЕНИЯ

САЗОНОВ Кирилл Евгеньевич – Крыловский государственный научный центр; Россия, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; Россия, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3; эл. почта: K_Sazonov@ksrc.ru

© К. Е. Сазонов

Развитие ледоколостроения в России и европейских странах, начавшееся во второй половине XIX в., закономерно привело моряков и судостроителей к необходимости изучения ледяного покрова замерзающих акваторий как среды мореплавания. Одной из важнейших характеристик льда, оказывающей важное влияние на ледокольные способности судна, является его прочность. Особенно остро вопрос о крепости морского и пресноводного льда встал перед вице-адмиралом С. О. Макаровым в период его борьбы за создание первого арктического ледокола «Ермак». Поэтому именно он явился инициатором проведения таких исследований. Примерно в одно и то же время с Макаровым к выводу о необходимости исследования прочностных свойств льда пришел известный корабельщик В. И. Афанасьев, который вместе со своим сыном выполнил ряд экспериментов. К анализу полученных экспериментальных данных Макаров привлек заведующего опытным бассейном А. Н. Крылова. В данной статье описывается история проведения указанных экспериментов и анализируются полученные выводы, которые надолго стали практически единственными данными о прочностных свойствах морского и пресного льда.

Ключевые слова: прочность льда, пресный лед, морской лед, С. О. Макаров, В. И. Афанасьев, А. Н. Крылов.

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2022 г.

EARLY STUDIES OF ICE STRENGTH PROPERTIES FOR THE PURPOSES OF ICEBREAKER CONSTRUCTION IN RUSSIA

SAZONOV Kirill Evgenievich – *Krylov State Research Center; Moskovskoe shosse, 44, St. Petersburg, 196158, Russia; St. Petersburg State Marine Technical University; Lotsmanskaya ul., 3, St. Petersburg, 190121, Russia; E-mail: K_Sazonov@ksrc.ru*

© K. E. Sazonov

Abstract: Icebreaker construction that began to develop in Russia and Europe in the second half of the 19th century dictated the need for seafarers and shipbuilders to study the ice covers of the freezing waters as navigation environment. One of the most important characteristics on which the ships' ice-breaking capabilities depend is ice strength. The problem of sea and freshwater ice strength was particularly urgent for Vice Admiral S. O. Makarov when he was putting the case for building the first Arctic icebreaker *Yermak*. It was for this reason that he initiated these studies. At about the same time, a renowned shipbuilder V. I. Afanasiev also came to the conclusion that it was necessary to study ice strength properties, and carried out a number of experiments together with his son. Makarov engaged A. N. Krylov, Superintendent of the Towing Tank, in the experimental data analysis. The article describes the history of, and analyzes the conclusions from, these experiments that for a long time remained the only source of data on strength properties of sea and freshwater ice.

Keywords: ice strength, freshwater ice, sea ice, S. O. Makarov, V. I. Afanasiev, A. N. Krylov.

For citation: Sazonov, K. E. (2023) *Pervye issledovaniia prochnostnykh svoistv l'da v Rossii dlia nuzhd ledokolostroeniia* [Early Studies of Ice Strength Properties for the Purposes of Icebreaker Construction in Russia], *Voprosy istorii estestvoznaniia i tekhniki*, vol. 44, no. 1, pp. 20–36, DOI: 10.31857/S020596060024503-5.

Введение

В настоящее время исследование прочностных свойств морского и пресноводного льда является обязательным элементом практически всех гляциологических и прикладных ледотехнических исследований. В результате выполнения многолетних экспериментальных исследований в мире накоплен обширный банк данных о прочности льда при различных видах деформации, о влиянии на нее различных факторов, разработаны и продолжают развиваться методики таких исследований¹. Эти данные используются при решении различных фундаментальных и прикладных задач, включая задачи проектирования и эксплуатации современного арктического флота.

¹ Лавров В. В. Деформация и прочность льда. Л.: Гидрометеиздат, 1969; Сазонов К. Е. Модельный и натурный эксперимент в морской ледотехнике. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2021 и др.

На рубеже XIX–XX вв. ледоколы и суда ледового плавания активно использовались в ряде европейских стран, включая Россию, и в Америке ². В это же время начался процесс становления морской ледотехники как нового направления в развитии технических наук. Знания же о прочностных свойствах льда практически отсутствовали. Несмотря на то что последняя треть XIX в. характеризовалась бурным развитием исследований механических свойств конструкционных материалов и созданием в разных странах специализированных лабораторий, которые занимались изучением этого вопроса, основные усилия были направлены на изучение свойств стали и чугуна ³. Исследования других конструкционных и естественных материалов почти не выполнялись. В данной работе рассматриваются первые исследования прочности льда, выполненные в России специалистами, которые имели непосредственное отношение к изучению движения судов во льдах.

Состояние вопроса о прочности льда в конце XIX в.

Осознание того факта, что прочность льда, наряду с его толщиной, имеет большое значение при проектировании и эксплуатации ледоколов, по-видимому, пришло в последнем десятилетии XIX в. В первой теоретической работе Р. Рунеберга ⁴, посвященной анализу движения судов во льдах ⁵, понятие прочности льда явно не используется. В формуле для определения величины разрушающего лед вертикального усилия, которая была предложена в этом исследовании, усилие зависит лишь от толщины льда и ширины корпуса судна. Формально прочность льда входит в эмпирический коэффициент, который был определен на основании анализа скудных данных об эксплуатации уже построенных ледоколов. В статье же, опубликованной в том же журнале через 11 лет ⁶, Рунеберг подробно обсуждает влияние прочности льда на ледовые качества судов и приводит обнаруженные им данные об их изучении. Автор ссылается ⁷ на исследования Фрюлинга (*Frühling*) из Кёнигсберга (публикация 1885 г.), который изучал прочность на разрыв ледяных стержней в зависимости от их температуры, при этом для диапазона температуры от -2 до -1 °C она составляла $11,1\text{--}28$ кг/см², а для диапазона

² Андриенко В. Г. Ледокольный флот России, 1860-е – 1918 гг. М.: Европейские издания, 2009. С. 17–37, 51–216.

³ Тимошенко С. П. История науки о сопротивлении материалов. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1957. С. 331–340.

⁴ Якоб Роберт (Роберт Иванович) Рунеберг (1846–1919) – выдающийся финский инженер, сын национального поэта Финляндии Йохана Людвиг Рунеберга (1804–1877). Занимался различной инженерной деятельностью, в том числе проектированием судов для плавания во льдах. О его жизни см: Сазонов К. Е. Инженер Роберт Рунеберг: между Финляндией и Россией // Природа. 2021. № 6 (1270). С. 67–79.

⁵ *Runeberg R. On Steamers for Winter Navigation and Ice-Breaking // Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1889. Vol. 97. Iss. 1889. P. 277–301.*

⁶ *Runeberg R. Steamers for Winter Navigation and Ice-Breaking // Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1900. Vol. 140. Iss. 1900. P. 109–123.*

⁷ К сожалению, по указанным в статье Рунеберга ссылкам обнаружить статьи не удалось. Поэтому информация об этих исследованиях приводится по статье Рунеберга.

от +1 до +2 °С – 7,1–9,4 кг/см². Кроме этого, Фрюлинг исследовал прочность льда при раздроблении и получил значения, лежащие в диапазоне 15–27,26 кг/см².

Рунеберг приводит также данные американского исследователя У. Ладлоу (*W. Ludlow*) и профессора из Гельсингфорса Хольстера (*Holster*). Первый из указанных исследователей изучал прочность на раздробление льда из реки Кеннебек (год публикации не указан) и получил довольно значительный разброс экспериментальных данных (от 23 до 70,7 кг/см²). Финский исследователь изучал прочность льда при раздроблении (публикация 1893 г.), образцы которого добывались из натурного льда при температуре –20 °С. Им также получен довольно большой разброс экспериментальных данных (28–68 кг/см²). Из анализа приведенных данных, отмечая очень большие вариации полученных значений прочности льда, Рунеберг сделал вывод о том, что

не следует ожидать, что при нынешнем знании этого вопроса формула для ледакольной способности парохода может давать любые, кроме приближительных результатов ⁸.

В работе В. И. Арнольда-Алябьева⁹, опубликованной в 1928 г., приводятся дополнительные данные о зарубежных исследованиях прочностных свойств пресного льда, которые были выполнены до 1890 г. Тем не менее с полной уверенностью можно утверждать, что все эти работы не были известны профессиональному сообществу моряков и судостроителей, которые занимались проектированием и эксплуатацией ледакольного флота.

Очень показательна запись в записной книжке С. О. Макарова, относящаяся к 1897 г. Летом этого года Макаров посетил Стокгольм и имел беседу со знаменитым полярным исследователем профессором Н. А. Э. Норденшельдом. Готовясь к этой беседе, он подготовил ряд вопросов:

Спросить у Норденшельда:

- 1) Что он знает о крепости полярного льда?
- 2) Какой % какого льда можно встретить?
- 3) Насколько летний лед слабее зимнего? ¹⁰

Далее, планируя разговор с другим известным полярным исследователем О. Свердрупом, Макаров собирается у него узнать: «Лед от пресной воды слабее или сильнее?» ¹¹

Вице-адмирал С. О. Макаров после зарождения у него идей покорения Северного полюса с помощью ледакола очень внимательно изучал любую информацию, относящуюся к плаваниям судов во льдах, включая данные о состоянии ледяного покрова и его свойствах. Уже после постройки

⁸ *Runeberg. Steamers for Winter Navigation...* P. 113.

⁹ *Арнольд-Алябьев В. И. Ледовые аварии в Балтийском море и борьба с ними // Морской сборник. 1928. № 4. С. 162–181.*

¹⁰ *Левоневский Д. А. С. О. Макаров и завоевание Арктики. Л.; М.: Изд-во Главсевморпути, 1943. С. 209.*

¹¹ Там же.

ледокола «Ермак» в одном из писем А. Н. Крылову (это письмо не сохранилось) он узнавал, известны ли ему какие-либо работы по прочности льда, выполненные ранее. В ответном письме Крылов сообщает следующее:

...пользуюсь случаем, чтобы обратить внимание Вашего превосходительства на статью W. Struve, помещенную в *Mémoires de l'Académie des Sciences de St.-Petersbourg*, sixième série, sciences mathématiques et physiques, t. IV за 1850 г. под заглавием: *Sur la dilatation de la glace, d'après les expériences faites en 1845 et 1846 a l'Observatoire central de Poulkova par M. M. Schumacher, Pohrt et Moritz*; эти опыты, произведенные под руководством такого астронома, как В. Я. Струве, по своей обстоятельности, точности и обработке весьма замечательные, но, если я не ошибаюсь, мало известны, будучи описаны в столь мало читаемом сборнике, как *Mémoires Pet. Ac.* Вместе с тем я припоминаю, что, разбирая издания СПб. Академии наук за первое столетие ее существования, чтобы составить себе полное собрание работ Эйлера, я встретил работу о крепости льда при разных температурах, но не могу ее теперь найти, так как часть этих книг у меня теперь отдана в переплет, а так как этот вопрос не представлял для меня особенного интереса, то я и не помню ни имени автора, ни названия сочинения¹².

Приведем еще мнение одного из пионеров исследований движения судов во льдах инженера-механика В. И. Афанасьева. В своей книге, посвященной ледоколам, он следующим образом предваряет описание выполненных им и его сыном опытов по определению прочности льда: «Мы не встречали опытов над прочностью льда, хотя, быть может, таковые и были произведены где-либо»¹³.

Приведенные выше материалы показывают, насколько в конце XIX в. во всем мире в целом и в России в частности были скудны знания о полярных регионах, ледяном покрове и его основных свойствах, в том числе и прочностных. В конце XIX в. инициаторами проведения исследований прочностных свойств льда выступили российские военные моряки Макаров и Афанасьев, связанные со строительством и эксплуатацией ледоколов. Решение о проведении экспериментов было принято ими независимо друг от друга.

¹² Красоткина Т. А. Из переписки А. Н. Крылова с С. О. Макаровым, И. П. де-Колонгом, Н. Е. Жуковским и другими // Труды Института истории естествознания и техники. 1956. Т. 15. С. 107. В примечаниях к этому письму указывается, что, по-видимому, речь в нем идет о работе: *Struve W. Notiz über die Untersuchungen des Eises als fester Körper* // Bulletin de la Classe physico-mathématique de l'Académie impériale de sciences de Saint-Petersbourg. 1845. Т. 4. № 10–11. Р. 169–170.

¹³ Афанасьев В. И. Материалы к изучению движения судна. III. Ледоколы. СПб.: Тип. Морского министерства, 1899. С. 38. На титульном листе книги фамилия написана через букву «о». О деятельности В. И. Афанасьева см.: *Каменев Г. Ф. Жизнь и деятельность инженера-механика В. И. Афанасьева* // Труды Ленинградского кораблестроительного института. Л.: Судпромгиз, 1951. Вып. 8. С. 110–116.

Исследования, инициированные С. О. Макаровым

В 1897 г. Макаров, находясь в Англии, инициировал проведение опытов по определению прочностных свойств льда; были проведены эксперименты по «раздавливанию» образцов и разрушению ледяных балок «изломом» (изгибом). Для проведения экспериментов был приготовлен пресный, «малосоленоводный» и «соленоводный» искусственный лед. Пресный лед изготовлялся из речной воды, используемой для питья. Соленоводный — из воды Немецкого (Северного) моря, которую отбирали для проведения опытов недалеко от устья р. Тайн. Удельный вес этой воды составлял 1,025¹⁴. Вода, из которой изготовлялся малосоленоводный лед, представляла собой смесь морской воды с пресной, ее удельный вес составлял 1,018.

Эксперименты по разрушению ледяных балок изгибом были выполнены в Ньюкасле, а эксперименты по раздавливанию — 22 декабря 1897 г.¹⁵ в Дургамской¹⁶ высшей технической школе (Дарем)¹⁷. Искусственный лед изготовлялся в холодильной камере. Для разрушения балок изгибом было изготовлено специальное приспособление, эскиз которого (рис. 1) Макаров приложил к письму Крылову от 26 июня (9 июля) 1900 г. С помощью приспособления реализовывалась трехточечная схема изгиба балки. Нагрузка на балку, приложенная на равном расстоянии от опор, осуществлялась с помощью деревянной треугольной призмы. В 10 опытах были разрушены по три балки пресного и соленоводного льда, а также четыре балки малосоленоводного льда. При выполнении опытов фиксировались геометрические размеры балок и разрушающая их нагрузка.

Опыты по раздавливанию льда, выполненные в Дареме, отличаются большей информативностью, что, по-видимому, связано с более удобными условиями проведения исследований в механической лаборатории. В этих экспериментах, помимо определения нагрузки, вызывающей раздробление льда, были выполнены измерения его температуры и деформации, предшествующей разрушению.

В последующие годы Макаров продолжал при любой возможности заниматься организацией исследований прочностных свойств льда. Афанасьев указывает, что в 1898 г. в физической лаборатории Санкт-Петербургского университета по просьбе Макарова были проведены испытания цилиндрического образца льда, в которых изучалась реакция льда на долговременное

¹⁴ В данном случае удельный вес воды измеряется в безразмерных единицах. Приведенная величина показывает, во сколько раз вес исследуемой воды превышает вес пресной воды при температуре 4 °С.

¹⁵ Из переписки А. Н. Крылова... С. 105.

¹⁶ Так в оригинале, современный вариант — «даремской».

¹⁷ Крылов А. Н. Наблюдения над крепостью льда и сопротивлением его движению ледокола «Ермак» // Собрание трудов академика А. Н. Крылова / Отв. ред. В. И. Смирнов, Ю. А. Шиманский. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949. Т. 9. Ч. 2. С. 165; Афанасьев. Материалы к изучению движения судна... С. 42, 59. В работе «Из переписки А. Н. Крылова...» (с. 105) в комментарии к письму 16 содержится, по-видимому, ошибочное утверждение о том, что все опыты были проведены в механической лаборатории Дургэмской колледжа.

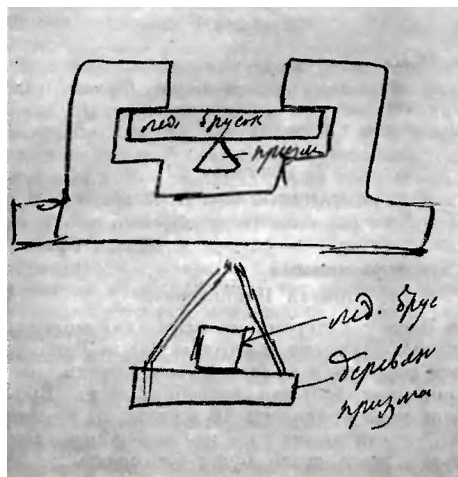


Рис. 1. Устройство для разрушения ледяных балок. Из письма С. О. Макарова А. Н. Крылову от 26 июня (9 июля) 1900 г. (Из переписки А. Н. Крылова... С. 109)

ны измерения прочности льда на изгиб. Для проведения исследований на борт ледокола был поднят довольно большой кусок льда, вырубленный из ледяного покрова (рис. 2). Вот как описывает проведение этих исследований участник экспедиции лейтенант И. И. Ислямов:



Рис. 2. Подъем на борт ледокола «Ермак» куска льда для проведения с ним физических исследований (Ислямов. Пробное плавание «Ермака»... С. 201)

действие приложенной нагрузки¹⁸. Испытываемый образец имел высоту 1 см и диаметр 2 см. Он был подвергнут долговременному действию нагрузки в 15 кг, что соответствовало давлению 1,88 пудов на квадратный дюйм. Действие нагрузки продолжалось в течение нескольких часов, максимум 44,4 часа. Из приведенного в работе Афанасьева описания можно понять, что было испытано несколько образцов льда при различной температуре, при этом исследовалась максимальная деформация образца.

В первом арктическом плавании ледокола «Ермак» летом 1899 г. в Баренцевом море в районе архипелага Шпицберген наряду с другими научными исследованиями были выполне-

ны измерения свойств льда. Для исследования свойств льда мы подняли на корабль большую льдину и сначала определили ее температуру в разных ее слоях. Оказалось, что температура идет, уменьшаясь к низу льдины, что должно способствовать ее хрупкости <...>

Затем из блока льда выпиливались правильные параллелепипеды и определялось сопротивление их и их плавучесть.

Кроме того, определялся удельный вес воды, получавшейся от разных образчиков льда.

И наши опыты показывают, что крепость и плотность льда возрастают от поверхности к низу и что он очень

¹⁸ Афанасьев. Материалы к изучению движения судна... С. 52.

хрупок (пуля из Винчестера при выстреле в упор входит в лед лишь на один дециметр)¹⁹.

Эксперименты по разрушению ледяных балок на борту «Ермака» проводил сверхштатный астроном Пулковской обсерватории Б. П. Остащенко-Кудрявцев²⁰. Для проведения опытов использовалось то же самое приспособление, что и при исследованиях, проведенных в Ньюкасле. Это обстоятельство способствовало тому, что размеры исследованных в полевых условиях балок были сопоставимы с размерами балок, приготовленных из искусственного льда.

Исследования В. И. Афанасьева

Самостоятельные исследования прочности искусственного льда при разрушении изгибом были предприняты зимой 1898 г. В. И. Афанасьевым и его сыном инженером-механиком Н. В. Афанасьевым. Первоначально результаты экспериментов и их анализ публиковались автором в газете «Котлин»²¹, а затем эти статьи в качестве приложения были включены в его книгу²². Предваряя публикацию опытных данных, В. И. Афанасьев писал:

Быстро развивающееся применение ледоколов и ледоходных судов вызывает необходимость изучения механических свойств льда, т. е. его сопротивления действующим на него разрушающим силам. Без знания таких свойств льда нет, очевидно, никаких средств для расчета силы, потребной для прохода с назначенною скоростью льда определенной толщины. Не зная механических свойств льда, нельзя также построить ледокол соразмерно прочный для преодоления сопротивления льда²³.

Представленные Афанасьевым результаты обладают большей информативностью по сравнению с опытами Макарова. В своих статьях он довольно подробно описывает способ приготовления искусственного льда, внешние условия проведения опытов. Он честно указывает на то, что

получаемые результаты, конечно, не обладают желаемой степенью точности, но, во всяком случае, они все-таки могут служить для приблизительного решения наиболее важных вопросов, возбуждаемых потребностью в ледоходных судах и ледоколах²⁴.

¹⁹ Исламов И. Пробное плавание «Ермака» на севере в 1899 г. // Записки по гидрографии. 1901. Вып. 23. С. 200–201.

²⁰ Борис Павлович Остащенко-Кудрявцев (1877–1956) — астроном, доктор физико-математических наук, профессор; работал в Пулковской, Николаевской и Харьковской обсерваториях, преподавал в харьковских институтах.

²¹ См. статьи В. И. Афанасьева в газете «Котлин» за 1898 г.: «Крепость льда». № 9 (563), 14 (568); «Пластичность и крепость льда». № 17 (571), 21 (575), 23 (576); «Крепость льда». № 37 (590).

²² Афанасьев. Материалы к изучению движения судна... С. 36–59.

²³ Там же. С. 36.

²⁴ Там же. С. 38.

Эксперименты проводились Афанасьевым в «домашних» условиях. В начале их проведения для получения ледяных балок использовались цинковые формы, в которых намораживались бруски размером $1\frac{1}{2} \times 1\frac{1}{2} \times 18$ д²⁵. В этих формах вода замораживалась в вертикальном положении. При замораживании первых образцов выяснилось, что в цинковых формах с «глухими доньшками» наблюдается выпучивание форм, вызванное увеличением объема льда по сравнению с объемом замерзающей воды. Для дальнейшего приготовления ледяных брусков «глухие доньшки» были заменены на резиновые пробки, применение которых позволило устранить выпучивание. Для извлечения брусков из форм они на небольшое время омывались водопроводной водой, после чего бруски можно было легко достать. Уменьшение размеров бруска от таяния льда не превышало $\frac{1}{16} \div \frac{1}{8}$ д.

Разрушение брусков изгибом осуществлялось по трехточечной схеме, при этом расстояние между опорами было $12\frac{1}{2}$, 8 и 3 д. Уменьшенные значения расстояний между опорами использовались для дальнейшего разрушения обломков брусков. Исследовалось также сопротивление льда скалыванию. Для этих опытов расстояние между опорами принималось равным 1 д.

Первая серия опытов, выполненная с цинковыми формами, показала их недолговечность, поэтому для дальнейших экспериментов использовались цилиндрические стеклянные формы, изготовленные из толстостенных трубок различного диаметра. Приготовление образцов осуществлялось с использованием естественных отрицательных температур воздуха от -15 до -8 °С. Афанасьев отмечает, что скорость замерзания влияет на внешний вид образца, чем эта скорость ниже, тем прозрачней образец.

По-видимому, в конце 1898 г. Афанасьев выполнил еще одну серию экспериментов с искусственным льдом. В этой серии лед готовился как из пресной, так и из соленой воды, причем замораживание образцов осуществлялось в стесненных условиях (стеклянные трубки) и в «открытых формах»²⁶. Кроме этого, часть образцов была приготовлена из кипяченой воды. Все это позволило сделать предварительные выводы о влиянии способа замораживания и качества замораживаемой воды (соленая, кипяченая) на прочностные свойства льда.

Анализ А. Н. Крыловым данных о крепости льда

Макаров обратился к Крылову с просьбой рассмотреть данные о крепости льда, полученные во время первого арктического плавания ледокола «Ермак». В письме от 14 (26) марта 1900 г. он писал Крылову:

Пожалуйста, помогите разобраться. Дело в том, что во время плавания в Ледовитом океане мы делали различные исследования над льдами. Между прочим, мы испытывали его крепость. Вычисления сделаны астрономом Кудрявцевым

²⁵ Здесь и далее «д» означает дюйм. 1 дюйм = 25,39954 мм, такое соотношение было узаконено в России в начале XX в.

²⁶ К сожалению, подробности замораживания льда в «открытых формах» и сами формы в работе не описаны.

в произвольных цифрах, и потому получились величины, сравнимые между собой, но мало сравнимые с величиною крепости других материалов. Мне решительно некогда подсесть к этому делу, и причем я же себе не вполне верю ²⁷.

Как следует из приведенной цитаты, первоначально Макаров просит Крылова «подыскать такой коэффициент», позволяющий перевести полученные данные в общепринятую в то время систему единиц измерения. Крылов сразу же откликнулся на эту просьбу и уже в ответном письме 18 (30) марта подробно сообщил о выполненных им расчетах и найденном коэффициенте для пересчета результатов в кг/см^2 , который оказался равен 8,13 ²⁸. 30 апреля (13 мая) Макаров высылает Крылову результаты опытов, выполненных в Англии. В письме от 26 июня (9 июля) он сообщает подробности проведения этих опытов (рис. 1) ²⁹.

Следующее письмо Крылова Макарову от 14 (27) июля является одним из наиболее важных результатов определения прочностных свойств льда, а также дальнейшего развития этого направления исследований. В этом письме он предлагает Макарову при публикации результатов по определению прочности льда обязательно указывать не только окончательный результат, но и геометрические размеры ледяных балок и величину разрушающей их нагрузки. Крылов объясняет свое предложение тем, что простая формула, заимствованная из теории изгиба балок, получена на основании целого ряда довольно серьезных допущений, применимость которых для такого материала, как лед, неизвестна. Он пишет:

Точная теория изгиба коротких брусков такого материала, как лед (скорее кристаллического, нежели изотропно-упругого строения), чрезвычайно сложна и тоже до предельных напряжений не относится. Вот почему вычисляемый по формуле коэффициент К (прочность льда. – К. С.) не дает столь полного суждения о крепости льда, как подлинные данные, полученные из наблюдений, которые потом всякий может обработать по-своему ³⁰.

Некоторые из основных положений этого письма были впоследствии включены Крыловым в его статью ³¹, помещенную в качестве главы в книгу Макарова ««Ермак» во льдах» ³². В разделе статьи, посвященном исследованиям крепости льда, приводятся откорректированные результаты испытаний. Анализируя их, Крылов отмечает «большое разнообразие результатов даже при одинаковых размерах испытываемых образцов, их температуры и способа нагрузки» ³³. Тем не менее он делает правильный вывод о том, что соленый лед «менее крепок», чем пресноводный. Далее он указывает, что

²⁷ Из переписки А. Н. Крылова... С. 85.

²⁸ Там же. С. 87.

²⁹ Там же. С. 103.

³⁰ Там же. С. 113.

³¹ Крылов. Наблюдения над крепостью льда... С. 168.

³² Макаров С. О. «Ермак» во льдах. СПб.: Типография СПб. Акционерного общества печатного дела в России Е. Евдокимов, 1901.

³³ Крылов. Наблюдения над крепостью льда... С. 167.

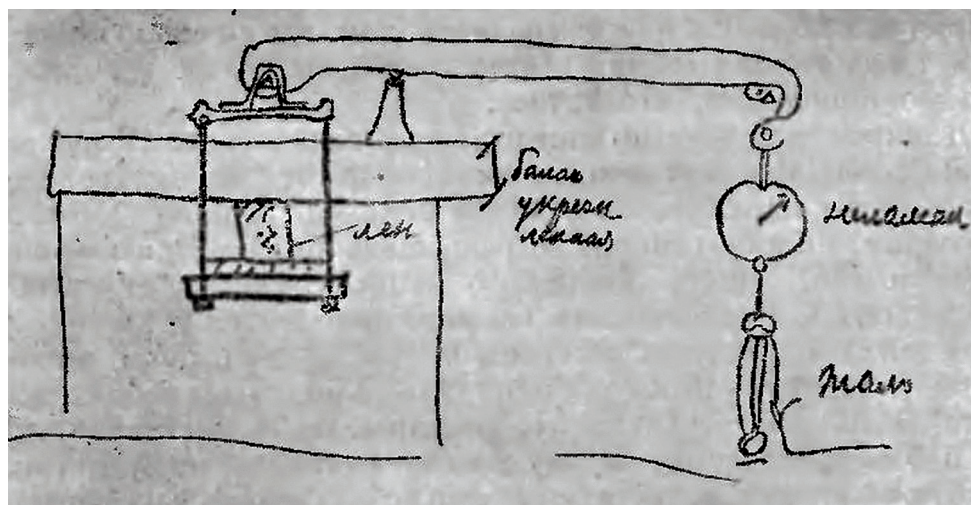


Рис. 3. Схема пресса для раздавливания образцов льда. Рисунок из письма А. Н. Крылова С. О. Макарову от 29 апреля (12 мая) 1901 г. (Из переписки А. Н. Крылова... С. 127)

нельзя усмотреть причин сказанного разнообразия, и лишь дальнейшие исследования в связи с исследованием строения льда и его свойств как упругого тела могут объяснить причины этого разнообразия ³⁴.

В какой-то мере эти слова стали программой последующих исследований прочности льда в России.

В этом же письме Крылов формулирует задачу теории упругости, относящуюся к разрушению ледяного покрова корпусом судна. Это задача об изгибе полубесконечной пластины, лежащей на упругом основании, сосредоточенной силой, которая приложена к кромке пластины. В задаче необходимо найти распределение напряжений в пластине в окрестности точки приложения усилия, а также положение линии излома пластины. Он указывает, что решение этой задачи «весьма трудно», и предлагает подходить к «приблизительному» ее решению «опытным путем», используя «стеклянные площадки» ³⁵. Крылов также указывает, что он обсудил эту задачу с профессором Н. Е. Жуковским, который согласился с тем, что эта задача важна для изучения разрушения ледяного покрова корпусом судна. Решение этой задачи было получено лишь во второй половине XX в. ³⁶

На 1901 г. была запланирована вторая арктическая экспедиция «Ермака», в которой Макаров предложил участвовать Крылову и Жуковскому. Крылов принял самое деятельное участие в подготовке арктического плавания,

³⁴ Там же.

³⁵ Из переписки А. Н. Крылова... С. 114.

³⁶ См., например: Гильман Л. С. Определение напряжений в плавающей ледяной плите, ограниченной прямолинейной кромкой, от действия нагрузки, приложенной к кромке // Труды Высшего инженерно-технического училища ВМФ. 1948. Вып. 4. С. 21–35; Хейсин Д. Е. Прочность ледяного покрова под действием нагрузки, приложенной к его кромке // Труды Арктического и антарктического НИИ. 1960. Т. 237. С. 133–152.

способствуя оснащению экспедиции различными научными приборами. Он планировал взять их в опытовом бассейне, а также обратиться за помощью к известным ученым Д. И. Менделееву, М. А. Рыкачеву и Б. Б. Голицыну. Специально для экспедиции Крылов разрабатывает проект пресса для определения сопротивления льда раздавливанию (рис. 3). В письме Макарову содержится следующее описание пресса: «Отношение плеч рычага 6 : 36. Предельная нагрузка на раздавливаемый кусок до 2 тонн, причем усилие на динамометре 20 пудов. Запас прочности 5 раз»³⁷.

Крылов собирался изготовить этот пресс на Балтийском заводе, «который мне обещал подобное за нивелировку спускового фундамента и другие работы, которые я им делал»³⁸. К сожалению, никакой информации о том, был ли изготовлен пресс или нет, не имеется.

По независящим от Крылова причинам он не смог принять участие в экспедиции. Второе полярное плавание «Ермака» окончилось неудачно (ледокол из-за сильных ледовых сжатий попал в 28-дневный ледовый плен недалеко от Новой Земли). После же возвращения из плавания правительством было принято решение «ограничить деятельность ледокола “Ермак” проводкой судов в портах Балтийского моря»³⁹. Сложившаяся ситуация не способствовала дальнейшему изучению прочностных свойств льда.

В. И. Афанасьев о прочности льда

Судя по всему, В. И. Афанасьев сам обрабатывал данные экспериментов по определению прочности искусственного льда, которые выполнял его сын. При анализе экспериментов он все время пытается выявить некоторые общие закономерности. Так, сравнив результаты испытаний брусков с прямоугольным и круглым сечениями, он заключает, что «сопротивление пресноводного льда перелому не зависит ни от формы поперечного сечения брусков, ни от их размеров, ни от расстояния между опорами»⁴⁰. Далее он обобщает полученные результаты и рекомендует: «Наибольшее напряжение, выдерживаемое льдом при изгибе <...> для пресноводного льда может быть принято равным 6½ пудов на кв. дюйм, или 15 тонн на кв. фут»⁴¹. Он также отмечает, что технология замораживания брусков (вертикально или горизонтально) заметно не повлияла на результаты опытов.

Такие же выводы о влиянии формы поперечного сечения и технологии замораживания Афанасьев сделал и при анализе данных по скалыванию льда. Представляется довольно важным полученный им результат о меньшей прочности льда на скалывание по сравнению с изгибом.

³⁷ Из переписки А. Н. Крылова... С. 128.

³⁸ Там же.

³⁹ *Стефанович А. Н.* Адмирал С. О. Макаров — создатель первого в мире арктического ледокола «Ермак» // Деятельность вице-адмирала С. О. Макарова в судостроении / Ред. А. И. Дубравин. Л.: Судостроение, 1977. С. 141.

⁴⁰ *Афанасьев.* Материалы к изучению движения судна... С. 40.

⁴¹ Там же.

Капризы петербургской погоды позволили Афанасьеву и его сыну исследовать прочность на раздробление тающих цилиндрических столбиков льда при температуре воздуха 4 °С. В результате, по-видимому, впервые был получен важный результат о существенном снижении прочности льда при таянии.

В 1898 г. Афанасьев получил письмо от Макарова с результатами испытаний льда, выполненными в Англии. Он сразу же принялся их анализировать, а по результатам анализа опубликовал в нескольких номерах газеты «Котлин» заметку⁴², которую потом включил в свою книгу. Обобщив результаты по изучению раздробления льда, Афанасьев делает вывод о снижении прочности льда при увеличении солёности воды, из которой был приготовлен образец. При этом он отмечает довольно большой разброс экспериментальных данных. Интересно сравнение прочностных свойств льда на раздавливание с данными по разрушению изгибом ледяных брусков, которые были получены им и его сыном. Выяснилось, что прочность на изгиб примерно в два раза меньше, чем при сжатии⁴³.

Довольно тщательно Афанасьев разбирает результаты экспериментов по измерению деформации образцов льда при сжатии. Для анализа результатов он вводит коэффициент β , который предполагает «пропорциональность между величиной сжатия (деформации). — К. Е.) и давлением на единицу площади поперечного сечения»⁴⁴. В книге содержатся результаты вычислений указанной величины для каждого из опытов, а также средние величины для каждого из рассмотренных типов льда. На основании опытов наибольшее значение коэффициента получилось для «малосоленоводного» льда. Далее следует довольно показательное рассуждение, которое ярко демонстрирует так называемый «инженерный» подход к проблеме.

Ввиду того, что солёность Балтийского моря весьма мала, а солёность воды Ледовитого океана весьма близка к образцу С («соленоводному». — К. С.) льда, мы можем исключить из рассмотрения лед В («малосоленоводный». — К. С.) как совершенно ненужный для наших практических целей⁴⁵.

Далее Афанасьев вводит коэффициент пластичности льда, который является обратной величиной к коэффициенту β . Пластичность льда он пытается использовать для анализа процессов взаимодействия корпуса ледокола со льдом. Он пишет:

Известно, что при морозе ледокол легче проходит сплошной лед, нежели при оттепели. Этот факт легко объясняется влиянием на сопротивление движению пластичности льда <...> Действительно, судно, идущее в сплошном льду,

⁴² Афанасьев В. И. Пластичность и крепость льда // Котлин. 1898. № 17 (571), 21 (575), 23 (576).

⁴³ Афанасьев. Материалы к изучению движения судна... С. 44.

⁴⁴ Там же. С. 46.

⁴⁵ Там же. С. 51. Приведенная цитата практически совпадает с известным анекдотом «Логик, математик, физик и инженер», приведенным в книге известного венгерского математика: *Пойа Д. Математика и правдоподобные рассуждения*. М.: Наука, 1975. С. 33.

не только ломает его, но и разжимает в стороны, чем только и можно объяснить плотное прилегание льда к корпусу ледокола ⁴⁶.

Как уже отмечалось выше, в конце 1898 г. сын Афанасьева выполнил еще одну серию экспериментов с искусственным льдом, как пресноводным, так и соленоводным. Результаты опытов позволили уточнить обобщенные данные о прочности пресного и соленого льда. Афанасьев отмечает, что его результаты хорошо совпадают с данными Макарова, полученными при изломе балок в Англии. Крылов в письме Макарову от 14 (27) июня 1900 г. также указывал на то, что, «сопоставляя эти результаты (данные о прочности натурального льда. — К. С.) с данными, полученными В. И. Афанасьевым, видим довольно близкое согласие» ⁴⁷.

Заключение

Описанные в работе исследования прочностных свойств льда сыграли важную роль в развитии знаний о свойствах ледяного покрова. Был получен ответ на принципиальный вопрос о соотношении крепости пресного и морского льда, выявлено сильное влияние температуры льда на его прочностные свойства. Впервые были установлены приближенные соотношения между прочностями льда при различных видах деформации. Не менее важными можно считать результаты о зависимости прочностных свойств от условий замораживания льда, что позволило Крылову сделать вывод о необходимости исследования его структуры.

Последующая судьба описанных исследований сложилась по-разному. Данные по прочности льда, полученные по инициативе Макарова и обработанные Крыловым, в 30-х гг. прошлого века активно использовались различными исследователями, занимавшимися освоением советской Арктики и прилегающих к ней регионов. Они использовались судостроителями ⁴⁸, гидротехниками ⁴⁹, специалистами по физике льда ⁵⁰. Ссылок же на работы Афанасьева автору обнаружить не удалось. По-видимому, забвение работ Афанасьева произошло по двум причинам. Первая заключается в том, что фигуры вице-адмирала Макарова и академика Крылова имели несравненно больший вес в глазах исследователей 1930-х гг. Оценки и высказывания

⁴⁶ Афанасьев. Материалы к изучению движения судна... С. 53.

⁴⁷ Из переписки А. Н. Крылова... С. 112.

⁴⁸ Маслов А. И. Опыт расчета внешних усилий, действующих на корпус судна в ледовых условиях // Труды Всесоюзного научного инженерно-технического общества судостроения ВНИИТОСС. Л.: Судпромгиз, 1937. Т. 2. Вып. 3. С. 129–132; Витман Ф. Ф., Шандриков Н. П. Некоторые исследования механической прочности льда // Труды Арктического института. 1938. Т. 110. С. 83–100.

⁴⁹ Кузнецов П. А. Действие льда на сооружения морских портов и защита от него. Л.: Инженерный отдел Краснознаменного Балтийского флота, 1939.

⁵⁰ Вейнберг Б. П. Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда. М.; Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1940.

Крылова в среде судостроителей (и не только) воспринимались как истина в последней инстанции⁵¹.

Вторая причина связана деятельностью самого Афанасьева, который был инженером-практиком. Изучая движение судов на чистой воде и в ледовых условиях, он стремился получить эмпирические или полуэмпирические зависимости, позволяющие определять требуемую мощность главных механизмов судна, которая бы обеспечивала требуемую скорость движения. Так, основываясь на опубликованных данных о работе во льдах двух паромов и финских и шведских небольших ледоколов, Афанасьев предложил «практическую» формулу для определения мощности энергетической установки, которая обеспечивала бы непрерывное движение судна во льдах заданной толщины. Предложенная формула была предельно простой и включала эмпирический коэффициент и два параметра: толщину льда в квадрате и скорость судна⁵². Близкие по структуре формулы автор предлагал для различных по типу судов в случае движения их на чистой воде. На рубеже XIX–XX вв. эти формулы активно использовались судостроителями. Например, Крылов в 1903 г. в составленном им курсе по теории корабля для старшего специального класса Морского кадетского корпуса для определения характеристик ходкости судна предлагал наряду с применением методов модельного эксперимента использовать формулу Афанасьева⁵³.

Срок жизни эмпирических расчетных формул в судостроении не очень долг. Неизбежные изменения в размерах судов, их конструкции, увеличение энерговооруженности и целый ряд других факторов приводят к тому, что предсказательный потенциал ранее полученных выражений иссякает. Поэтому интерес к работам Афанасьева постепенно пропал, а его работы перестали использоваться. К сожалению, этот процесс коснулся и работ по изучению прочности льда, которые не только подтверждали выводы, полученные Макаровым и Крыловым, но и в некотором отношении были более информативными и интересными.

References

- Andrienko, V. G. (2009) *Ledokol'nyi flot Rossii, 1860-e – 1918 gg. [Icebreaking Fleet of Russia, 1860s – 1918]*. Moskva: Evropeiskie izdaniia.
- Afonas'ev, V. I. (1899) *Plastichnost' i krepost' l'da [Plasticity and Strength of Ice]*, *Kotlin*, no. 17 (571), no. 21 (575), no. 23 (576).
- Afonas'ev, V. I. (1899) *Materialy k izucheniiu dvizheniiu sudna. III. Ledokoly [Materials for the Study of Vessel Movement. III. Icebreakers]*. Sankt-Peterburg: Tipografiia Morskogo ministerstva.
- Arnol'd-Aliab'ev, V. I. (1928) *Ledovye avarii v Baltiiskom more i bor'ba s nimi [Ice Accidents in the Baltic Sea and Fight Against Them]*, *Morskoi sbornik*, no. 4, pp. 162–181.

⁵¹ Некоторые примеры такого отношения, описанные на основе архивных документов, приведены в работе: Сазонов К. Е. «Царь-ледокол» академика А. Н. Крылова // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 2. С. 208–221.

⁵² Афанасьев. Материалы к изучению движения судна... С. 16.

⁵³ Крылов А. Н. Записки по теории кораблестроения: курс старшего специального класса Морского кадетского корпуса. СПб.: Типо-литография К. Биркенфельда, 1903. С. 188.

- Gil'man, L. S. (1948) *Opređenje napriazhenii v plavaiushchei ledianoj plite, ograničennoi priamolineinoi kromkoi, ot deistvii nagruzki, prilozhennoi k kromke* [Determination of Stresses in a Floating Ice Slab, Bounded by a Straight Edge, from the Action of a Load Applied to the Edge], *Trudy Vysshego inženerno-tekhnicheskogo učilišča VMF*, no. 4, pp. 21–35.
- Islamov, I. (1901) *Probnoe plavanie "Ermaka" na severe v 1899 g* [Trial Voyage of Yermak in the North in 1899], *Zapiski po gidrografii*, no. 23, pp. 194–217.
- Kamenev, G. F. (1951) *Zhizn' i deiatel'nost' inžener-mekhanika V. I. Afanas'eva* [The Life and Work of a Mechanical Engineer V. I. Afanasiev], *Trudy Leningradskogo korablestroitel'nogo instituta*, no. 8, pp. 110–116.
- Kheisin, D. E. (1960) *Prochnost' ledianogo pokrova pod deistviem nagruzki, prilozhennoi k ego kromke* [The Strength of Ice Cover Under the Action of a Load Applied to Its Edge], *Trudy Arkticheskogo i Antarkicheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*, vol. 237, pp. 133–152.
- Krasotkina, T. A. (1956) *Iz perepiski A. N. Krylova s S. O. Makarovym, I. P. de-Kolongom, N. E. Zhukovskim i drugimi* [From the Correspondence Between A. N. Krylov and S. O. Makarov, I. P. de Colongue, N. E. Zhukovsky, and Others], *Trudy Instituta istorii estestvoznaniya i tekhniki*, vol. 15, pp. 54–167.
- Krylov, A. N. (1903) *Zapiski po teorii korablestroeniia: kurs starshego spetsial'nogo klassa Morskogo kadetskogo korpusa* [Notes on the Theory of Shipbuilding: A Course for the Senior Special Class of the Naval Cadet Corps]. Sankt-Peterburg: Tipo-litografiia K. Birkenfel'da.
- Krylov, A. N. (1949) *Nabliudeniia nad krepost'iu l'da i soprotivleniem ego dvizheniiu ledokola "Ermak"* [Observations on Ice Strength and Its Resistance to the Movement of the Yermak Icebreaker], in: Smirnov, V. I., and Shimanskii, Iu. A. (eds.) *Sobranie trudov akademika A. N. Krylova* [A Collection of Works by Academician A. N. Krylov], vol. 9, pt. 2, pp. 165–182.
- Kuznetsov, P. A. (1939) *Deistvie l'da na sooruzheniia morskikh portov i zashchita ot nego* [The Effect of Ice on the Seaport Facilities and Protection from It]. Leningrad: Inženernyi otdel Krasnoznamennogo Baltiiskogo flota.
- Lavrov, V. V. (1969) *Deformatsiia i prochnost' l'da* [Ice Deformation and Strength]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
- Levonevskii, D. A. (1943) *S. O. Makarov i zavoevanie Arktiki* [S. O. Makarov and the Conquest of the Arctic]. Leningrad and Moskva: Izdatel'stvo Glavsevmorputi.
- Makarov, S. O. (1901) *"Ermak" vo l'dakh* [Yermak in the Ice]. Sankt-Peterburg: Tipografiia SPb. aktsionernogo obshchestva pechatnogo dela v Rossii E. Evdokimov.
- Maslov, A. I. (1937) *Opyt rascheta vneshnikh usilii, deistvuiushchikh na korpus sudna v ledovykh usloviiah* [An Attempt at Calculating External Forces Acting on the Hull in Ice Conditions], *Trudy Vsesoiuznogo nauchnogo inženerno-tekhnicheskogo obshchestva sudostroeniia*, vol. 2, no. 3, pp. 129–132.
- Poia, D. (Pólya, G.) (1975) *Matematika i pravdopodobnye rassuzhdeniia* [Mathematics and Plausible Reasoning]. Moskva: Nauka.
- Runeberg, R. (1889) *On Steamers for Winter Navigation and Ice-Breaking (Including Plates at Back of Volume)*, *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 97, iss. 1889, pp. 277–301.
- Runeberg, R. (1900) *Steamers for Winter Navigation and Ice-Breaking (Including Plates at Back of Volume)*, *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 140, iss. 1900, pp. 109–123.
- Sazonov, K. E. (2021) *Model'nyi i naturnyi eksperiment v morskoi ledotekhnike* [Model and Full-Scale Experiment in Marine Ice Engineering]. Sankt-Peterburg: Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr.
- Sazonov, K. E. (2021) *Inžener Robert Runeberg: mezhdue Finliandiei i Rossiei* [Engineer Robert Runeberg: Between Finland and Russia], *Priroda*, no. 6 (1270), pp. 67–79.
- Sazonov, K. E. (2021) *"Tsar'-ledokol" akademika A. N. Krylova* [Academician A. N. Krylov's "Tsar Icebreaker"], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, vol. 67, no. 2, pp. 208–221.
- Stefanovich, A. N. (1977) *Admiral S. O. Makarov – sozdatel' pervogo v mire arkticheskogo ledokola "Ermak"* [Admiral S. O. Makarov, the Creator of the World's First Arctic Icebreaker Yermak], in: Dubravin, A. I. (ed.) *Deiatel'nost' vitse-admirala S. O. Makarova v sudostroeni* [Activities of Vice Admiral S. O. Makarov in Shipbuilding]. Leningrad: Sudostroenie.

- Struve, F. G. W. (1845) Notiz über die Untersuchungen des Eises als fester Körper, *Bulletin de la Classe physico-mathématique de l'Académie impériale de sciences de Saint-Petersbourg*, vol. 4, no. 10–11, pp. 169–170.
- Timoshenko, S. P. (1957) *Istoriia nauki o soprotivlenii materialov [History of the Science of Material Strength]*. Moskva: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoi literatury.
- Veinberg, B. P. (1940) *Led. Svoistva, vzniknovenie i ischeznoenie l'da [Ice. Properties, Appearance and Disappearance of Ice]*. Leningrad and Moskva: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoi literatury.
- Vitman, F. F., and Shandrikov, N. P. (1938) Nekotorye issledovaniia mekhanicheskoi prochnosti l'da [Some Studies on Mechanical Strength of Ice], *Trudy Arkticheskogo instituta*, vol. 110, pp. 83–100.

Received: April 16, 2022.