

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ PAGES OF HISTORY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-2-303-316>

УДК 551.467



Изучение физических свойств льда в России и СССР (середина XIX в. — 1940 г.). Теплофизика льда

К.Е. Сазонов^{1, 2}✉

¹ Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия

✉ K_Sazonov@ksrc.ru

КЕС, 0000-0003-3364-1309

Аннотация. В работе рассматривается история изучения в России и СССР (середина XIX в. — 1940 г.) теплофизических характеристик льда. Зарубежные физики занимались изучением этих характеристик начиная с XVIII в. Первые исследования в России были выполнены лишь в 1845–1846 гг. по инициативе и при непосредственном участии академика В.Я. Струве его сотрудниками в Пулковской обсерватории. Следующие исследования выполнил в начале XX в. приват-доцент Юрьевского университета А.Д. Богоявленский, который экспериментально изучил теплоемкость и теплоту плавления пресного льда. Экспериментальные исследования по оригинальной методике коэффициента теплопроводности льда в 1928 г. были опубликованы С.А. Арцыбышевым и И.А. Парфиановичем. Большое влияние на понимание теплофизических процессов в морском льду оказало издание в 1930 г. книги Ф. Мальмгрена. Для уточнения некоторых положений этой книги В.В. Шулейкин с сотрудниками выполнил экспериментальное исследование влияния пористости льда на коэффициент теплопроводности. В 1932 г. были опубликованы книги А.Н. Комаровского и Н.Н. Зубова, содержащие сводки данных о физических свойствах пресного и морского льда. В рассматриваемый период активно развивалось прикладное направление ледотехники, связанное с теплофизическими процессами во льду. Это разработка эмпирических формул для прогнозирования толщины нарастающего льда в зависимости от числа градусо-дней мороза, изучение режеляции льда и послонного замораживания льда для создания ледяных складов и дорожного покрытия. В целом, хотя теплофизические характеристики льда были важны для целого ряда практических приложений, их исследованию не уделялось должного внимания.

Ключевые слова: удельная теплота плавления, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, толщина льда, Н.Н. Зубов, замораживание льда

Для цитирования: Сазонов К.Е. Изучение физических свойств льда в России и СССР (середина XIX в. — 1940 г.). Теплофизика льда. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2026;72(2):303–316. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-2-303-316>

Поступила 28.04.2026

После переработки 10.06.2026

Принята 17.06.2026

© Авторы, 2026

© Authors, 2026

Studies on ice physical properties in Russia and USSR (mid-19th century — 1940). Thermophysics of ice

Kirill E. Sazonov^{1, 2}✉¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia² St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

✉K_Sazonov@ksrc.ru

ID KES, 0000-0003-3364-1309

Abstract. This paper outlines the history of Russian and Soviet studies on the thermophysics of ice. Although in Europe this science existed as early as the 18th century, first Russian studies on ice thermophysics were conducted only in 1845–1846, in Pulkovo Observatory, by the research team of Academician V. Struve, upon the initiative and with immediate participation of the academician himself. Further studies were carried out in the early 19th century by A. Bogoyavlensky, privat-docent of Yuriev University, who experimentally investigated the heat absorption and melting point of fresh-water ice. Experimental studies on the heat conductivity coefficient of ice were carried out as per novel procedure, and the results were published by S. Artsibashev and I. Parfianovich in 1928. The understanding of sea ice thermophysical behaviour was heavily influenced by a book written by F. Malmgren and published in the year 1930. To elaborate on certain topics of the book, V. Shuleykin and his research team experimentally investigated the effect of ice porosity upon its heat conductivity coefficient. The year 1932 saw the publication of the books by A. Komarovskiy and N. Zubov, with data sheets on the physical properties of fresh-water and sea ice. The same years saw vigorous advances in applied ice engineering (in particular, thermophysical processes in ice). These included empirical expressions obtained for predicting ice thickness growth depending on the number of degree-days with cold temperatures, regelation of ice, as well as ice generation in layers for building ice roads and ice depots. On the whole, however, despite its relevance to many practical applications, ice thermophysics as a research field still remained of secondary importance.

Keywords: specific heat of fusion, specific heat absorption, heat conductivity coefficient, ice thickness, N. Zubov, ice generation

For citation: Sazonov K.E. Studies on ice physical properties in Russia and USSR (mid-19th century — 1940). Thermophysics of ice. *Arctic and Antarctic Research*. 2026;72(2):303–316. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-2-303-316>

Received 28.04.2026

Revised 10.06.2026

Accepted 17.06.2026

Введение

К теплофизическим свойствам льда обычно относят его удельную теплоту плавления, удельную теплоемкость, коэффициент теплопроводности и коэффициенты линейного и объемного расширения при изменении температуры. Важной теплофизической характеристикой является также температура плавления и ее зависимость от внешних факторов.

За рубежом теплофизические свойства льда стали изучаться одними из первых, что было связано с общим развитием физики. Так, Х. Шумахер указывает, что первые исследования коэффициента теплового расширения льда, опубликованные в 1749 г., были выполнены Ж.Ж. Дорту де Мераном для проверки теории Питера ван Мушенбрука [1, с. 307–309], в которой постулировалось существование материального теплого и холодного вещества в виде двух разных видов бесконечно тонких частиц, проникающих в поры тел и вытесняющих друг друга. Этот известный в то время физик утверждал, что чем холоднее, тем больше лед расширяется. Данной точки

зрения придерживались многие физики XVIII и XIX вв. По мнению де Мерана, его опыты полностью подтвердили теорию.

Результаты, показывающие уменьшение размеров пресного льда при понижении температуры, были получены П. Генрихом в 1806 г. В последующем такие измерения проводились и другими учеными.

По сообщению Х. Барнеса [2, 3], первым обратил внимание на скрытую теплоту фазового перехода вода–лед в 1762 г. Дж. Блэк из Эдинбурга, который получил значение этой величины, равное 79,7 кал/г. Позже изучением этой теплоты занимались в 1780 г. А. Лавуазье и П.С. Лаплас и многие другие ученые, уточняя значение этой тепловой константы.

Удельную теплоемкость первыми исследовали Ш.-Б. Дезорм и Н. Клеман (1819) и А. Авогадро (1833, 1834) довольно грубыми методами, поэтому их данные в дальнейшем не использовались. В. Рено (1843) и Ш. Персон (1850) получили результаты, позволившие предположить, что величина удельной теплоемкости льда увеличивается при приближении температуры к нулю, стремясь к значению теплоты фазового перехода. Дальнейшие исследования показали, что это не соответствует действительности.

Изучение коэффициента теплопроводности началось заметно позже. Первая публикация на эту тему, подготовленная Дж. Д. Форбсом по результатам своих работ десятилетней давности, вышла в 1874 г. Затем последовали работы У. Митчела (1885), П. Странео (1897) и др.

Все упомянутые выше эксперименты по определению теплофизических свойств льда требовали применения специальных экспериментальных установок и довольно высокой квалификации экспериментатора.

В рассматриваемый временной период — середина XIX в. — 1940 г. — такие работы в России практически не выполнялись, тем не менее развитие исследований теплофизики льда и применения этих свойств продолжалось, чему и посвящена данная статья.

Дореволюционные исследования

Первое исследование — возможно, именно с него началось изучение физических свойств льда в России — было выполнено в 1845–1846 гг. по инициативе и под общим руководством академика В.Я. Струве (рис. 1) в зимний период в Пулковской обсерватории ее сотрудниками Х. Шумахером, У. Портом и П.Г.А. Морицем.

В первом сообщении об этой работе В.Я. Струве объясняет свой интерес к проблеме термического расширения льда явным несоответствием значений этой величины, имеющихся в литературных источниках, с тем, что наблюдается в реальных условиях [4]. По данным П. Генриха, коэффициент термического расширения льда в 7 раз превышает аналогичный коэффициент для цинка, который имеет наибольшее расширение из всех твердых тел. Еще одной причиной стала публикация в 1843 г. швейцарским ученым О. Петцольдом работы, где он на основании выполненных им экспериментов утверждал, что при понижении температуры лед расширяется. Этот вывод он использовал для описания движения ледников. По поводу этой его работы В.Я. Струве пишет: «...он сделал неудачный кабинетный опыт, не зная явлений в природе, о которых любой земледелец в северных странах мог бы дать ему сведения» [4, с. 170]. Кроме этого, В.Я. Струве имел личный опыт определения теплового расширения различных тел, им даже была разработана оригинальная методика проведения подобных измерений [1, с. 299–301].



Рис. 1. Академик Василий Яковлевич (Фридрих Георг Вильгельм) Струве (1793–1864)¹

Fig. 1. Academician Vasily Yakovlevich (Friedrich Georg Wilhelm) Struve (1793–1864)

В начале исследований работы выполнялись двумя сотрудниками Пулковской обсерватории — Х. Шумахером и У. Портом. Ими были наморожены блоки льда длиной около 2 м, разработаны устройства для проведения измерений. Оба исследователя пользовались методикой В.Я. Струве, внося в нее необходимые для работы со льдом изменения. Наиболее полными являются эксперименты Х. Шумахера, который выполнил в общей сложности 153 различных полных измерения длины ледяного блока. Кроме этого, Х. Шумахер по своей инициативе выполнил, возможно, одни из первых в мире измерения теплопроводности льда. Он в течение двух с половиной часов с периодичностью 5 минут измерял изменение температуры блока, перемещенного с улицы в помещение. В его мемуарах эти результаты представлены в виде таблицы. К сожалению, эти уникальные данные остались неизвестными широкой научной общественности. Количество экспериментов, проведенных У. Портом, много меньше, чем у Шумахера. Эксперименты П.Г.А. Морица по методологии аналогичны экспериментам Порта, с несколькими незначительными изменениями. Их главное отличие от экспериментов двух его предшественников заключается в том, что он изучал термическое расширение льда в направлении, перпендикулярном горизонтальной поверхности воды.

Анализ результатов, полученных его сотрудниками, позволил В.Я. Струве сформулировать важный вывод: «Мы вправе признать: *то расширение льда в направлении поверхности, где происходит замерзание, такое же, как и расширение, происходящее в направлении, перпендикулярном поверхности*» [1, с. 305–306].

Результаты этих исследований были описаны в пяти публикациях, причем оригинальными являются только две, остальные — перепечатки. Основной является работа, вводная часть которой написана В.Я. Струве [1]. Остальное содержание этой публикации составляют мемуары Х. Шумахера и П.Г.А. Морица. Эта публикация

¹ Белявский С.И. (ред.). *Сто лет Пулковской обсерватории: сборник статей*. М.; Л.: Изд. АН СССР, 1945. 272 с.

осталась практически неизвестной. Исследователи льда пользовались короткой заметкой В.Я. Струве [4], опубликованной в ведущих европейских журналах².

Вторая работа была выполнена в 1904 г. приват-доцентом Императорского Юрьевского университета А.Д. Богоявленским [5]. Исследование физических свойств льда не было основной целью его работы. Он занимался изучением зависимости теплоемкости органических кристаллических веществ от температуры. В ряду исследованных веществ был и пресный лед, приготовленный из очищенной воды. В работе приводятся полученные автором экспериментальные данные — теплоемкость льда при изменении температуры. Кроме этого, автором были экспериментально получены значения теплоты плавления льда. Сравнение изложенных в этой работе результатов с аналогичными результатами других авторов показывает, что они достаточно хорошо совпадают.

Исследования советского периода

В 1928 г. вышла работа С.А. Арцыбышева и И.А. Парфиановича из Иркутского университета, посвященная определению коэффициента теплопроводности пресного льда [6]. В следующем году эта работа была опубликована в ведущем европейском физическом журнале [7]. Свой интерес к теме исследования авторы объясняют большим разбросом данных об этой характеристике льда в зарубежной литературе.

Для определения коэффициента теплопроводности в рассматриваемой работе был использован следующий метод, о котором авторы пишут так: «Бедность физической литературы в Иркутске не позволяет нам судить о том, насколько наш метод оригинален» [7, с. 403]. Суть метода заключалась в следующем. Был изготовлен толстостенный эбонитовый сосуд, дно которого было плоским и выполнено из красной меди. Этот сосуд с налитой в него водой ставился в сильно охлажденную ртуть. При этом вода намерзала на дне в виде ледяной пластинки. По измерениям толщины этой пластинки и величины теплового потока через днище сосуда рассчитывался коэффициент теплопроводности. В статье приводится вывод расчетного выражения, для получения которого были использованы вполне правдоподобные допущения.

Схема прибора показана на рис. 2. Для эксперимента использовалась кипяченая дистиллированная вода, залитая в сосуд *B*. Этот сосуд охлаждался тающим снегом до тех пор, пока температуры обоих спаев термомпары не становились одинаковыми. После этого прибор помещался в цилиндрический эбонитовый сосуд с медным дном, в который была налита ртуть с температурой $-14\dots-18$ °С. Примерно через 1–2 с начиналось ледообразование на дне, о чем свидетельствовало появление капли воды на конце трубки *F*, с этого момента начинался отсчет времени и фиксация показаний амперметра. Опыт продолжался 10–15 мин. После чего проводилось измерение веса воды, собранной в сосуд *g*, и измерения пластины образовавшегося льда, толщина которой была примерно равна 1 см.

В работе приведен тщательный анализ точности полученных результатов. Одним из источников погрешности было непосредственное измерение размеров пластинки, поэтому экспериментаторы стали оценивать толщину пластинки по объему вытесненной при ее росте воды, для чего они вывели соответствующую расчетную формулу. Другим источником погрешности было определение плотности льда,

² J. Prakt. Chemie. 1845;35(5):315–317; Pogg. Ann. 1845;66:298–300.

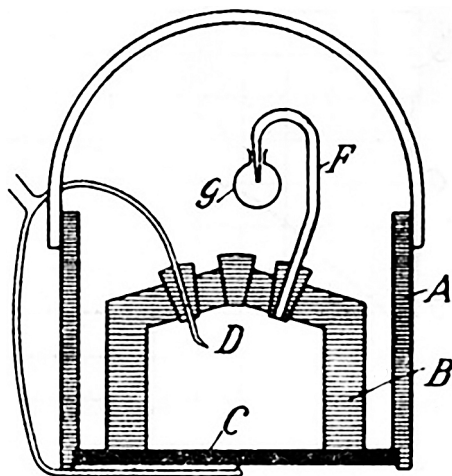


Рис. 2. Схема прибора С.А. Арцыбышева и И.А. Парфиановича [6, с. 405].

A — внешний эбонитовый сосуд с дном из красной меди; *B* — внутренний эбонитовый сосуд с толщиной стенок 8 мм, укрепленный на пластине *C*; *D* — термопара, один конец которой расположен во внутреннем пространстве сосуда *B*, а другой припаян ко дну *C*; *F* — изогнутая стеклянная трубочка, служащая для отвода воды; *g* — сосуд для сбора вытесненной воды

Fig. 2. Layout of test device used by S. Artsybyshhev and I. Parfianovich [6, p. 405].

A — ebony casing with red-copper bottom; *B* — internal ebony vessel with 8 mm, wall thickness, supported by plate *C*; *D* — thermocouple with one end inside vessel *B* and the other end fastened to bottom *C*; *F* — curved glass tube for water drainage; *g* — reservoir for displaced water

поэтому проводились отдельные измерения этой величины, для чего был изготовлен специальный прибор.

Всего было выполнено 16 опытов, результаты 6 из них были отсеяны по различным причинам, в том числе и из-за переохлаждения воды³. В результате авторы получили значение коэффициента теплопроводности, равное $\lambda = 0,0057$ кал/(см·с) с ошибкой 1,3 %.

Прежде чем перейти к дальнейшему рассмотрению работ, выполненных в нашей стране в области теплофизики льда, необходимо остановиться на работе шведского ученого Ф. Мальмгрена [8], которая во многом определила направления исследований физических свойств морского льда советскими исследователями. В 1922–1925 гг. он участвовал в плавании шхуны «Мод» в Арктике, во время которого выполнил исследования физических свойств льда, их результаты и изложены в его книге.

В области теплофизики им были исследованы теплоемкость льда и его коэффициент термического расширения, коэффициент теплопроводности. Выбор именно этих теплофизических характеристик обуславливался тем, что для морского льда первые две из указанных характеристик демонстрировали аномальное поведение. Объяснение этих аномалий связывалось с наличием в морском льде рассола, из-за которого при изменениях температуры протекают процессы кристаллизации и таяния

³ Можно предположить, что в переохлажденной воде мог образовываться внутриводный лед, влияющий на точность эксперимента.

льда, влияющие на тепловой баланс. На основе этого объяснения Ф. Мальмгрен провел теоретические выкладки и получил расчетные выражения для удельной теплоемкости льда и коэффициента теплового расширения в зависимости от солёности льда. При этом заданными величинами являлись теплофизические характеристики чистого льда. По этим формулам им были рассчитаны таблицы значений указанных характеристик при различной температуре и солёности льда.

Мальмгреном были выполнены экспериментальные исследования теплоемкости морского льда и его коэффициента термического расширения. Хорошее согласование экспериментальных данных с результатами расчетов явилось подтверждением влияния рассола и происходящих в нем процессов на рассматриваемые физические характеристики льда. При проведении исследований для определения теплоемкости были применены два метода. Первый, традиционный метод смешения, был неудобен и неточен, поэтому Мальмгреном был разработан другой метод, использующий в качестве нагревательного устройства металлическую проволоку, по которой пропускался ток. Измерения силы тока амперметром позволяли при известном сопротивлении проволоки довольно точно определить количество тепла, ею выделяемое. Для определения коэффициента объемного расширения льда Мальмгреном был сконструирован и изготовлен специальный прибор, позволяющий измерять изменение объема цилиндрического куска льда при варьировании температуры.

Отдельная глава книги посвящена исследованиям коэффициента теплопроводности льда. В начале этой главы Ф. Мальмгрен, рассматривая существующие способы определения этого коэффициента, показывает, что методы, основанные на решении задачи Стефана и применении формулы Фурье, не могут быть использованы для морского льда из-за зависимости теплоемкости и теплоты плавления льда от его солёности в первом случае и из-за конечности толщины ледяного покрова во втором. Он заключает, что единственный способ определения коэффициента по серии температур заключается в измерениях градиентов температур на разных глубинах. Этим методом он провел обработку двух серий измерений температуры льда с октября 1922 г. по август 1923 г. и с ноября 1923 г. по май 1924 г. Кроме этого, им был разработан и использован метод непосредственного определения коэффициента теплопроводности с использованием в качестве нагревательного элемента металлической проволоки, по которой пропускается электрический ток, и термопары. Результаты измерений коэффициента теплопроводности различными методами показали близкие значения.

Следующее исследование коэффициента теплопроводности льда было выполнено в 1929 г. В.В. Шулейкиным с сотрудниками [9]. Это исследование во многом было стимулировано работой Ф. Мальмгрена, о чем авторы пишут в начале статьи. В статье указывается: «...большое внимание уделил Мальмгрен измерению коэффициента теплопроводности морского льда в естественных условиях», «...им самим подчеркивается, что сложные косвенные пути, которыми приходится следовать для определения теплопроводности в естественных условиях, не обеспечивают вполне достоверных результатов» [9, с. 179]. У В.В. Шулейкина некоторые сомнения вызвала зависимость коэффициентов теплопроводности, полученных Ф. Мальмгреном, от толщины льда, в соответствии с которой этот коэффициент убывает, приближаясь к верхней поверхности ледяного покрова. Объяснение наблюдаемому эффекту Ф. Мальмгрен видел в наличии пузырьков воздуха в верхних слоях льда. Целью

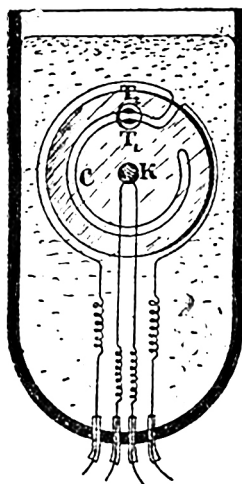


Рис. 3. Экспериментальная установка В.В. Шулейкина [9, с. 180].

К — клубок (нагревательный элемент); С — щиток из тонкого целлулоида; T_1 , T_2 — спаи термопары

Fig. 3. Test rig by V.Shuleykin [9, с. 180].

K — heating coil; C — thin celluloid screen; T_1 , T_2 — thermocouple joints

эксперимента В.В. Шулейкина было выяснение степени влияния газосодержания льда на его теплопроводность.

Для проведения эксперимента В.В. Шулейкин решил воспользоваться несколькими измененным вторым методом Ф. Мальмгрена. Схема созданной им экспериментальной установки показана на рис. 3. Нагревательный элемент из константановой проволоки, бифилярно свитый в клубок, был расположен в середине сосуда диаметром 8 см и высотой 15 см. В одной вертикальной плоскости с клубком, выше него на расстоянии 2 см находился один спай термопары, а еще выше на 0,4 см — другой. Клубок и спаи укреплялись на щитке из тонкого целлулоида. Между спаями располагался только слой льда, теплопроводность которого измерялась. В качестве воды, из которой приготавливался лабораторный лед для проведения экспериментов, использовался нарзан — т. к. теплопроводность газов может быть принята равной нулю по сравнению со льдом, в опыте воздух был заменен на углекислый газ. Газосодержанием льда можно было управлять, лишая нарзан перед замораживанием части растворенного в нем газа. После подключения нагревательного элемента к аккумулятору в эксперименте регистрировали показания амперметра, связанного с термопарой, через определенные промежутки времени. Фиксация его показаний продолжалась и после выключения нагревательного элемента. В результате получалась зависимость измеренной силы тока от времени, на графике площадь под этой функцией была пропорциональна общему количеству тепла, выделенного нагревательным элементом, и обратно пропорциональна коэффициенту теплопроводности.

В.В. Шулейкин пишет, что он вывел формулы для расчета этого коэффициента по измеренным в эксперименте данным и геометрическим характеристикам прибора, аналогичные формулам Ф. Мальмгрена. «Но нам показалось более надежным

элиминировать все случайные ошибки при обмерах прибора, неизбежные ввиду малости расстояний, и вычислять искомый коэффициент теплопроводности, пользуясь в качестве известной величины коэффициентом теплопроводности чистого (разрядка В.В. Шулейкина. — К.С.) льда, полученного из дистиллированной воды (лишенной растворенных газов)» [9, с. 182]. За такую величину В.В. Шулейкин принял данные, полученные С.А. Арцыбышевым и И.А. Парфиановичем. Поэтому были проведены опыты со льдом, замороженным из дистиллированной воды, и получены соответствующие графики, принятые далее за эталон.

В результате проведенных измерений В.В. Шулейкин пришел к выводу, что данные Ф. Мальмгрена, полученные первым способом, являются заниженными. По его мнению, коэффициент теплопроводности льда не может быть менее $3,9 \cdot 10^{-3}$ кал/(см·с), т. к. это значение соответствует очень малой плотности льда. Кроме этого, он отмечал, что второй способ Ф. Мальмгрена «позволяет производить такие измерения чрезвычайно удобно и в самых разнообразных условиях» [9, с. 185].

В 1932 г. вышли две небольшие книжки А.Н. Комаровского [10] и Н.Н. Зубова [11], которые сыграли большую роль в развитии исследований физических свойств льда. Книга А.Н. Комаровского была предназначена в первую очередь для инженеров-гидротехников, поэтому в ней рассматривались свойства пресного льда. В этой работе в области теплофизики пресного льда приведены в основном данные, полученные зарубежными исследователями. Из отечественных ученых упоминаются В.Я. Струве с сотрудниками и А.Д. Богдавленский, работа С.А. Арцыбышева и И.А. Парфиановича была автору неизвестна. В книге А.Н. Комаровского, по-видимому, впервые в массовой литературе, указывается на понижение температуры плавления льда при увеличении давления. Более интересной представляется работа Н.Н. Зубова, посвященная анализу физических свойств морского льда, которая была написана в преддверии Второго Международного полярного года. В предисловии к этой работе автор пишет, что она во многом основана на работе Ф. Мальмгрена и посвящена его памяти.

Рассматривая причины, влияющие на формирование солёности морского льда, Н.Н. Зубов на основе анализа теплового баланса растущего льда выводит уравнение для определения толщины льда, в котором использованы такие теплофизические характеристики, как коэффициент теплопроводности и теплота фазового перехода. Он пишет, что это уравнение было ранее выведено Т. Тамуро, а также приводит эмпирическую формулу Х. Барнеса [3]. Он указывает, что эти формулы получены для пресного льда, для которого можно принять постоянство указанных теплофизических величин. Для морского льда эти формулы не применимы и могут служить только для выполнения оценок.

При описании удельной теплоемкости льда и теплоты его фазового перехода Н.Н. Зубов, основываясь на данных Ф. Мальмгрена, несколько дополняет его исследования. Так, используя те же предположения, что и Ф. Мальмгрен, он дает собственный вывод формулы для определения теплоемкости льда. Зубов пишет: «Формула... по выводу и виду отличается от того, что дано Мальмгреном. Однако, так как она основана на тех же положениях, что и формула Мальмгрена, то и вычисления по ней приводят к тем же результатам» [11, с. 29]. Он продолжил вычисления Ф. Мальмгрена по нахождению числа грамм-калорий, необходимых для растапливания одного грамма морского льда в зависимости от температуры и солёности.

При рассмотрении теплопроводности морского льда Н.Н. Зубов приводит результаты Ф. Мальмгрена и В.В. Шулейкина. В итоге он констатирует: «...вопрос

о теплопроводности морского льда остается пока не решенным». И далее: «Во всяком случае, к настоящему моменту мы знаем, что коэффициент теплопроводности морского льда значительно больше коэффициента теплопроводности морской воды, равной, приблизительно, 0,0011, и теплопроводности снега» [11, с. 34, 35].

Позже в известном учебнике [12] Н.Н. Зубов несколько расширил текст работы [11], не внося существенных изменений и дополнений. Довольно подробная сводка данных по теплофизическим свойствам льда была опубликована в 1940 г. в коллективной монографии «Лед», изданной под редакцией и при непосредственном участии Б.П. Вейнберга [13].

Изложенным выше, по-видимому, исчерпываются непосредственные исследования теплофизических свойств льда, выполненные в рассматриваемый период в России. Тем не менее в то же время были проведены изыскания, так или иначе связанные с теплофизикой льда. Краткий обзор этих исследований представлен ниже.

Исследования, связанные с теплофизикой льда

В первую очередь к таким исследованиям следует отнести работы по изучению особенностей нарастания льда и прогнозированию его толщины. Одними из первых с этой задачей в 1920-х гг. столкнулись гидротехники, обеспечивающие строительство гидроэлектростанций в соответствии с планом ГОЭЛРО. Им было необходимо прогнозировать толщину льда, образовавшегося на реке перед ледоходом. В 1927 г. профессор В.Т. Бовин писал: «Количественная сторона процесса образования толщи поверхностного льда в зависимости от времени t и температуры θ до сих пор точно не выявлена» [14, с. 159]. Далее он указывал, что формула Х. Барнеса не может быть использована для этой цели, т. к. ледообразование на реках при наличии течения происходит иначе, чем в тихой воде. Тем не менее гидротехниками был предложен ряд эмпирических формул, в которых толщина льда была пропорциональна корню из суммы градусо-дней мороза (см., например, работу [15]).

В 30-х гг. прошлого века подобные исследования стали проводиться и на полярных станциях [12]: на о. Уединения в 1935–1936 гг., на м. Шмидта в 1936–1937 гг., в проливе Югорский Шар в 1929–1937 гг.; на о. Диксон были выполнены 13-летние наблюдения, обработанные Д.В. Карелиным [16]. Обобщение этих результатов содержится в книге Н.Н. Зубова [12].

Свой анализ Н.Н. Зубов начинает с рассмотрения решения Й. Стефаном (1891) задачи о росте льда за счет теплопроводности. Это теоретическое решение показывает, что толщина льда пропорциональна корню из суммы градусо-дней мороза. Н.Н. Зубов представил на одном графике зависимости толщины льда от количества градусо-дней мороза для теоретического решения Й. Стефана при варьировании величины коэффициента теплопроводности льда и результаты расчетов по эмпирическим формулам, полученным различными авторами. График показал, что эмпирические результаты располагаются между теоретическими значениями, полученными для коэффициента теплопроводности 0,002 и 0,003. Это доказывало, что эмпирика близка к физически обоснованной формуле Й. Стефана. Воспользовавшись одной из эмпирических формул, Н.Н. Зубов выводит соотношение между приростом толщины льда и приращением количества градусо-дней мороза. По этой формуле он проводит расчеты, результаты которых представлены в таблицах. Далее им приводятся оценки максимальной толщины однолетних и многолетних льдов [17].

В.Л. Цуриков проанализировал влияние снежного покрова на нарастание морского льда [18]. В 1939 г. им дан подробный анализ формул расчета толщины намерзающего льда [19]. В начале этой работы он пишет о рассматриваемых формулах: «Часть из них выведена гидрологами моря; как правило, эти формулы мало известны гидрологам суши. Другие формулы, наоборот, выведены гидрологами суши; они, как правило, мало известны морякам. Кроме того, даже среди гидрологов одной специальности не существует единого мнения по этому вопросу... В связи с этим рассмотрим некоторые из этих формул и выявим их достоинства и недостатки» [19, с. 115]. В работе содержится лишь критика рассмотренных формул, каких-либо рекомендаций автор не дает.

В какой-то мере к исследованиям процессов нарастания толщины льда примыкает экспериментальная работа В.И. Арнольд-Алябьева с сотрудниками⁴. Эта работа была выполнена по заданию Комиссии по изучению вечной мерзлоты АН СССР в мае 1934 г., ее целью было определение разницы в толщине ледяного покрова, намерзающего естественным образом, и покрова, в который был введен в процессе его формирования тонкий слой воздуха. Предполагалось, что введение такого слоя за счет изменения коэффициента теплопроводности может уменьшить толщину нарастающего льда. Такое предположение было выдвинуто специалистом по исследованию искусственного льда М.М. Крыловым.

Опыты проводились в холодильной камере Ленинградского порта при температуре $-7...-11$ °С. Для эксперимента были использованы две деревянные кадки диаметром 55 см и высотой 56 см, боковая поверхность которых была термоизолирована. Часть экспериментов проводилась в водонепроницаемом деревянном ящике. Для опытов использовалась водопроводная вода. Впуск воздуха под лед осуществлялся путем откачки части воды через просверленное в нем отверстие. При этом имелась возможность создавать воздушную каверну под всем ледяным покровом или под некоторой его частью. Попытки создать под ледяным покровом слой, состоящий из отдельных пузырьков, а не единую каверну не увенчались успехом. На проведение одного эксперимента затрачивалось примерно 40 часов.

В результате экспериментов была получена «экономия» толщины льда, лежащая в диапазоне от 10 до 25 %, причем преобладающая величина составляла 23 % при средней 20 %. Анализируя полученные результаты, В.И. Арнольд-Алябьев пишет, что, по его мнению, наиболее важными фактами отличия лабораторного эксперимента от естественных условий являются отсутствие теплопотерь за счет излучения и недостаточная термоизоляция сосудов, в которых замораживался лед. Также он отмечает, что в экспериментах по техническим причинам были реализованы относительно небольшие отрицательные температуры воздуха. Вывод из работы: «...можно считать выясненным, что % экономии в ледяном покрове, под влиянием пузырения, безусловно, имеет место...»⁵; исследования необходимо продолжать. Данных о дальнейшем продолжении этих работ обнаружить не удалось.

Еще одним направлением, связанным с теплофизикой льда, стал в середине 1930-х гг. интерес к процессу режеляции льда. Этот интерес был обусловлен спорами о природе образования донного льда. По одной из гипотез его образования, этот лед заносился с открытой поверхности воды, переносился турбулентным

⁴ Арнольд-Алябьев В.И. *Результаты лабораторных опытов с пузырением под льдом*. Российский государственный архив экономики. Ф. р-82. Оп. 2. Д. 11. 14 л.

⁵ Там же. Л. 9.

потоком жидкости и прикреплялся ко дну и предметам, расположенным в воде. Для объяснения процесса образования больших подводных скоплений льда некоторые авторы предлагали механизм режеляции. В частности, об этом писали такие авторитетные исследователи ледовых проблем, как профессора Б.П. Вейнберг [13, 20] и В.Е. Тимонов [21]. Б.П. Вейнбергом была даже разработана программа исследования процессов режеляции⁶, которая была частично выполнена несколько позже рассматриваемого периода.

Информация о теплофизических свойствах льда активно использовалась при развитии некоторых прикладных направлений ледотехники. В первую очередь это использование льда в качестве материала для строительства хранилищ для пищевых продуктов. Ведущая роль в развитии этого направления принадлежит М.М. Крылову, удостоенному в 1950 г. за эти работы звания лауреата Сталинской премии третьей степени. Первый проект долговременного склада был им создан в 1930 г., по этому проекту в Ленинграде было построено несколько складов, которые оказались не совсем удачными, но продемонстрировали принципиальную возможность сохранения ледяных конструкций летом [22, 23]. В дальнейшем М.М. Крылов усовершенствовал их конструкцию, и срок эксплуатации возрос до десяти лет⁷. Склады его конструкции получили большое распространение в военное и послевоенное время. Для их усовершенствования М.М. Крылов разрабатывал приближенные методы теплофизического расчета, занимался исследованиями искусственного замораживания льда. Так, к изучению послойного намораживания льда он приступил еще в 1926 г. [25]. В 1930-х гг. такие же исследования проводил М.М. Корунов с целью создания ледяных дорог. Им получены эмпирические формулы для определения времени замерзания слоя заданной толщины [24, 25].

В конце статьи необходимо упомянуть еще об одном направлении исследований, которое активно развивалось в довоенном Советском Союзе. Речь идет об изучении радиационных свойств льда. В рассматриваемый период, благодаря неутомимой деятельности профессора Н.Н. Калитина, в этом важном направлении были достигнуты значительные результаты. Однако подробное их рассмотрение выходит за рамки данной статьи.

Заключение

В предисловии к своей книге А.Н. Комаровский, комментируя работы зарубежных авторов, писал: «...эти авторы почти вовсе не приводят данных исследований русских физиков и инженеров, немало вложивших в дело изучения физических свойств льда» [10, с. 3]. Анализ, выполненный в данной работе, показывает, что в области исследования теплофизических свойств льда «эти авторы» были не так уж не правы.

По сравнению с изучением других свойств ледяного покрова (плотности, пористости, прочности и др.) теплофизические характеристики практически не изучались. Можно предположить, что такое положение вещей было вызвано относительной трудностью выполнения экспериментальных исследований теплофизических ха-

⁶ Центральный государственный архив научно-технической документации Санкт-Петербурга. Ф. р-369. Оп. 1-1. Д. 215. Л. 27.

⁷ Крылов М.М. *Склад для хранения овощей, скоропортящихся продуктов и других товаров в бочках*. Авторское свидетельство на изобретение № 72903. Заявлено 30 апреля 1940 г. Опубл. 30 ноября 1948 г.

рактических льда. Все описанные в работе эксперименты требовали изготовления специального оборудования и, часто, проведения долгих планомерных исследований, что не всегда было исполнимо и не стимулировало их развитие. Отсутствие интереса у исследователей к изучению теплофизических свойств льда сказывалось даже тогда, когда имелось необходимое оборудование, определение с его помощью этих свойств не планировалось. Примером может служить инструкция по стационарному изучению ледяного покрова Байкала Байкальской лимнологической станцией АН СССР [26], в которой для измерения температуры льда предусмотрено использование системы термопар, проходящих через всю толщу ледяного покрова. Данные, полученные этой системой, можно использовать для определения коэффициента теплопроводности льда по первому методу Ф. Мальмгрена, но такие работы не предусмотрены.

Возможно, поэтому большее распространение получило направление создания эмпирических формул для расчета нарастания льда, исходные данные для построения которых было проще получить в полевых условиях. Кроме того, эти формулы сразу давали ответ на задаваемые практикой вопросы в отличие значений теплофизических характеристик льда, которые надо было использовать в теоретических формулах.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Данное исследование не получало внешнего финансирования.

Competing interests. The author declares that there is no conflict of interest.

Funding. This research had no external funding.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Struve W. Sur la dilatation de la glace, d'après les expériences faites en 1845 et 1846 a Pulkovo par M.M. Schumacher, Pohrt et Moris. *Memoires d'Acad. Imp. de Science de St.-Petersbourg. Ser. 6. Sci. phys. et math.* 1850;4(3–4):297–384.
2. Barnes H.T. *Ice formation*. New York: John Wiley & sons; London: Chapman & Hall, Limited; 1906. 250 p.
3. Барнес Х. *Ледотехника*. Л.; М.: Государственное энергетическое издательство; 1934. 200 с.
4. Struve W. Notiz über die Untersuchungen des Eises als fester Körper. *Bulletin de l'Academie de St.-Petersbourg, cl. phys.-math.* 1845;4(10–11):169–170.
5. Богоявленский А. Д. *Об изменении теплоемкости кристаллических веществ с температурой*. Юрьев: Тип. Маттисена; 1904. 73 с.
6. Арцыбышев С.А., Парфианович И.А. Определение коэффициента теплопроводности льда. *Журнал русского физико-химического общества*. 1928;VX(5):405–409.
Artsybyshhev S.A., Parfianovich I.A. Determination of the thermal conductivity coefficient of ice. *Journal of the Russian Physical-Chemical Society*. 1928;VX(5):405–409. (In Russ.).
7. Arzybychew S., Parfianowitsch J. Das Wärmeleitvermögen des Eises. *Z. Physik*. 1929;56(7–8):441–445.
8. Мальмгрен Ф. *О свойствах морского льда*. Л.: Изд. Гидро-метеор. ком. СССР, ГОИ и Гидрограф. упр.; 1930. 90 с.
9. Шулейкин В.В., Русанов Н.И., Рябчиков В.А. Зависимость между теплопроводностью льда и его структурой. *Журнал геофизики*. 1931;1(1–2):179–186.
Shuleikin V.V., Rusanov N.I., Ryabchikov V.A. Relationship between thermal conductivity of ice and its structure. *Journal of Geophysics*. 1931;1(1–2):179–186. (In Russ.).
10. Комаровский А.Н. *Структура и физические свойства ледяного покрова пресных вод*. Л.; М.: Государственное энергетическое издательство; 1932. 51 с.

11. Зубов Н.Н. *Некоторые свойства морского льда*. М.: Изд. Гидро-метеор. ком. СССР и РСФСР; 1932. 44 с.
12. Зубов Н.Н. *Морские воды и льды*. М.: Гидрометеиздат; 1938. 453 с.
13. Вейнберг Б.П. *Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда*. М.; Л.: Гос. изд. техн.-теор. лит.; 1940. 524 с.
14. Бовин В.Т. Лед и борьба с ним при гидротехнических сооружениях гидравлических станций. *Материалы к проекту И.Г. Александрова*. Вып. III. М.: Изд. Днепровского строительства; 1927. С. 159–194.
15. Быдин Ф.И. Изучение роста льда в природных условиях. *Известия Научно-Исследовательского Института Гидротехники*. 1932;IV:175–183.
Bydin F.I. Study of ice growth under natural conditions. *News of the Research Institute of Hydraulic Engineering*. 1932;IV:175–183. (In Russ.).
16. Карелин Д.В. Ледовые наблюдения полярных станций. *Советская Арктика*. 1938;2:51–52.
Karelin D.V. Ice observations of polar stations. *Soviet Arctic*. 1938;2:51–52. (In Russ.).
17. Зубов Н.Н. О предельной толщине морских многолетних льдов. *Метеорология и гидрология*. 1938;4:123–131.
Zubov N.N. On the maximum thickness of multi-year sea ice. *Meteorology and Hydrology*. 1938;4:123–131. (In Russ.).
18. Цуриков В.Л. О влиянии снега на нарастание морского льда. *Метеорология и гидрология*. 1938;7:113–127.
Tsurikov V.L. On the influence of snow on the growth of sea ice. *Meteorology and Hydrology*. 1938;7:113–127. (In Russ.).
19. Цуриков В.Л. Несколько замечаний относительно формул нарастания ледяного покрова. *Труды Байкальской лимнологической станции*. 1939;IX:115–125.
Tsurikov V.L. Some remarks concerning the formulas for ice cover growth. *Transactions of the Baikal Limnological Station*. 1939;IX:115–125. (In Russ.).
20. Вейнберг Б.П. Режеляция льда и снега. *Труды Арктического института*. 1938;110:5–13.
Weinberg B.P. Resolution of ice and snow. *Transactions of the Arctic Institute*. 1938;110:5–13. (In Russ.).
21. Тимонов В.Е. К вопросу о теоретических обоснованиях главнейших ледовых процессов в водоемах (Опыт установления рабочей гипотезы). *Известия Научно-Исследовательского Института Гидротехники*. 1935;XVI:15–53.
Timonov V.E. On the theoretical justification of the main ice processes in reservoirs (an attempt to establish a working hypothesis). *Bulletin of the Research Institute of Hydraulic Engineering*. 1935; XVI:15–53. (In Russ.).
22. Крылов М.М. *Ледяные изотермические склады*. М.: Изд-во АН СССР; 1951. 88 с.
23. Щелоков В.К. *Ледяные хранилища*. М.: Наука; 1967. 120 с.
24. Корунов М.М. Скорость образования льда на ледяных дорогах. *Лесная индустрия*. 1939;2:22–26.
Korunov M.M. Ice formation rate on icy roads. *Lesnaya Industriya*. 1939;2:22–26. (In Russ.).
25. Корунов М.М. Интенсивность образования ледяного слоя из воды, налитой на лед. *Метеорология и гидрология*. 1940;12:92–94.
Korunov M.M. Intensity of formation of an ice layer from water poured onto ice. *Meteorology and Hydrology*. 1940;12:92–94. (In Russ.).
26. Верещагин Г.Ю. Работы Байкальской лимнологической станции по изучению ледяного покрова Байкала. *Труды Байкальской лимнологической станции*. 1939;IX:5–21.
Vereshchagin G.Yu. Work of the Baikal Limnological Station on the study of the ice cover of Lake Baikal. *Transactions of the Baikal Limnological Station*. 1939;IX:5–21. (In Russ.).