СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ
PAGES OF HISTORY

https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-501-518
УДК 551.467

CC BY

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ ORIGINAL PAPER

Изучение физических свойств льда в России и СССР (конец XIX в. — 1940 г.). Плотность и пористость льда

К.Е. Сазонов [1,2]✉

[1] *Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия*

✉kirsaz@rambler.ru

КЕС, 0000-0003-3364-1309

Аннотация. В работе рассматривается развитие изучения в России и СССР (конец XIX в. – 1940 г.) важнейшей характеристики льда — его плотности. Показано, что российские ученые занялись изучением плотности льда лишь в самом конце XIX в., причем эти исследования часто проводились с прикладными целями, например работы Б.П. Вейнберга и его учеников в Томске в 1911–1914 гг. В СССР интерес к исследованиям возродился в конце 1920-х гг. и был связан с развитием исследований в полярных морях. Измерения плотности в основном осуществлялись методом гидростатического взвешивания. По просьбе Н.Н. Зубова и И.И. Месяцева в 1927 г. В.В. Шулейкин создал простой прибор, позволяющий выполнять процедуру определения плотности льда без взвешивания образца. В начале 1930-х гг. важным направлением исследований становится изучение пористости льда, целью которого было выяснение причин изменчивости экспериментальных данных о плотности льда. Для проведения исследований пористости В.В. Шулейкиным и В.И. Арнольдом-Алябьевым были разработаны оригинальные приборы, которые обеспечили возможность изучения этих характеристик льда в экспедиционных условиях. Наибольшее распространение в практике полевых исследований получил прибор Арнольда-Алябьева. Плотность и пористость льда тесно связанные друг с другом физические величины, поэтому измерения пористости льда позволяли по полученным результатам вычислять его плотность. К концу 1930-х гг. измерение плотности льда становится стандартной процедурой при осуществлении ледовых исследований. Этому способствовала разработка во Всесоюзном арктическом институте под руководством Б.П. Вейнберга планов исследования льда на полярных станциях, которые включали изучение пористости и плотности.

Ключевые слова: В.И. Арнольд-Алябьев, Б.П. Вейнберг, Н.Н. Зубов, лабораторный лед, морской лед, плотность, пористость, пресный лед, удельный вес, В.В. Шулейкин

Для цитирования: Сазонов К.Е. Изучение физических свойств льда в России и СССР (конец XIX в. — 1940 г.). Плотность и пористость льда *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023; 69(4): 501–518. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-501-518

Поступила 22.08.2023 **После переработки 17.10.2023** **Принята 19.10.2023**

Studies of ice physical properties in Russia and USSR (late XIXth century – 1940). Ice density and porosity

Kirill E. Sazonov[1,2]✉

[1] *Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia*

[2] *St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia*

✉kirsaz@rambler.ru

KES, 0000-0003-3364-1309

Abstract. The paper deals with studies conducted in Russia and USSR of ice density, a most important characteristic of ice, and spans a period from the late XIXth century to 1940. It is shown that Russian scientists started their investigations of ice density only around the end of the XIX century, and those studies were often performed with specific applications in mind, e. g. works by B.P. Veinberg and his disciples in Tomsk in 1911–1914. In the USSR, there was a revival of interest in this kind of studies in the late 1920s in connection with explorations of the polar seas. Density measurements were mainly performed by hydrostatic weighing. At the request of N.N. Zubov and I.I. Mesyatsev in 1927 V.V. Shuleikin invented a simple instrument to measure ice density without weighing samples. In the early 1930s, ice porosity became an important field of research aimed at finding the causes of variance of experimental data on ice density. Ice porosity and density were studied using innovative devices developed by V.V. Shuleikin and V.I. Arnold-Alyabiev, which allowed studying ice properties in expedition conditions. The device developed by Arnold-Alyabiev found widespread use in field studies. Ice density and porosity are closely related physical quantities, therefore measuring the porosity of ice allowed researchers to estimate its density. By the end of the 1930s the ice density measurements had developed into a standard procedure of ice studies, which was due in large measure to the plans devised at the All-Union Arctic Institute headed by B.P. Veinberg to investigate ice at polar stations, which also included ice density and porosity studies.

Keywords: V.I. Arnold-Alyabiev, density, fresh-water ice, laboratory ice, porosity, sea ice, specific weight, V.V. Shuleikin, B.P. Veinberg, N.N. Zubov

For citation: Sazonov K.E. Studies of ice physical properties in Russia and USSR (late XIXth century – 1940). Ice density and porosity. *Arctic and Antarctic Research*. 2023; 69 (4): 501–518. (In Russ.). https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-501-518

Received 22.08.2023 **Revised 17.10.2023** **Accepted 19.10.2023**

Введение

Плотность является важнейшей характеристикой любого вещества, именно поэтому ее изучению уделяется большое внимание. С середины XIX в. в мире получила распространение техническая система единиц измерения, в которой основными механическими единицами были метр, килограмм-сила и секунда. В этой системе единиц плотность имела очень неудобную размерность кгс·с^2·м$^{-4}$, поэтому в исследованиях, как правило, использовалось понятие удельного веса $\gamma = P/V$, P — вес, V — объем, с размерностью кгс·м$^{-3}$. Часто исследователями использовался безразмерный относительный удельный вес, для которого в качестве единицы измерения принимался удельный вес пресной воды при температуре 4 °С. Все безразмерные значения удельного веса льда, встречающиеся в статье, являются относительными. Для относительных величин понятие удельного веса и плотности совпадают. Различные авторы использовали как один, так и другой термин, при этом опуская слово «относительный». Далее в статье мы будем пользоваться обоими терминами, в зависимости от терминологии, использованной автором рассматриваемой работы.

Среди других веществ изучался и удельный вес льда. В одной из своих монографий [1] известный канадский исследователь профессор Г. Барнес, живший на рубеже XIX–XX вв., указывает, что первый эксперимент по определению относительной плотности льда был выполнен Р. Бойлем в 1772 г. Им использовался лабораторный лед, намораживаемый во время проведения эксперимента из пресной воды. Определение удельного веса льда осуществлялось на основании измерения изменения объема льда по отношению к объему воды, из которой лед был приготовлен. Бойлем было получено значение удельного веса, равное 0,903. По мнению Барнеса, этот результат не имеет научного значения, т. к. при проведении эксперимента не был учтен целый ряд важных факторов, оказывающих на него влияние.

В книге Барнеса [1, с. 30–45] приведена подробная сводка зарубежных исследований плотности льда, выполненных до 1902 г. При этом подробно описаны применяемые экспериментальные методики, обсуждены их достоинства и недостатки. Особенностью всех приводимых результатов является то, что они получены либо для пресного льда естественного происхождения, либо для лабораторного льда, приготовленного из пресной воды. Данных о плотности морского льда не приводится.

Необходимо констатировать, что в России, как это ни странно, исследованиям льда до конца XIX в. практически не уделялось внимания. Были опубликованы лишь отдельные работы, посвященные в основном физико-географическому описанию ледяного покрова, а также описанию процессов замерзания и таяния льда. Ряд показательных примеров, демонстрирующих уровень осведомленности российских исследователей, в частности С.О. Макарова, о физических свойствах льда приведен в работе [2]. Однако бурное развитие, начиная со второй половины XIX в., железнодорожного транспорта и ледоколостроения создало предпосылки для начала исследований физических свойств льда в России.

Исследования дореволюционного периода

Судя по опубликованным источникам, первые измерения удельного веса льда в России были выполнены астрономом Б.П. Остащенко-Кудрявцевым под руководством С.О. Макарова во время первого плавания ледокола «Ермак» в Арктике [3, с. 412–417]. Для его определения из поднятой на палубу глыбы льда выпиливались бруски размером 5 × 5 × 20 см, которые затем опускались вертикально в банку, заполненную морской водой. При этом проводились измерения возвышения бруска над уровнем воды для каждой из сторон. После этого брусок опускался в банку другим концом, и выполнялись те же измерения. Температура и удельный вес морской воды измерялись до и после наблюдений. Среднее значение измеренных величин использовалось для определения удельного веса льда x[1] по следующей формуле:

$$x = \Delta \frac{H}{H + h},$$

где Δ — удельный вес морской воды во время проведения опыта; H — глубина погружения бруска; h — возвышение бруска над уровнем воды в стакане.

[1] В статье используются обозначения физических величин, которые были приняты авторами разбираемых работ. В рассматриваемый период времени еще не существовало общепринятых единых обозначений для физических величин.

Рис. 1. Борис Петрович Вейнберг (1871–1942)
Fig. 1. Boris Petrovich Weinberg (1871–1942)

В результате исследований, которые выполнялись несколько дней с глыбами льда различного происхождения, было получено, что удельный вес льда, отнесенный к удельному весу дистиллированной воды при 4 °С, изменяется в диапазоне от 0,846 до 0,936. Значения этой характеристики, полученные в экспедиции, в течение долгого времени считались минимальными для морского льда.

В 1903 г. вышла обзорная работа Н.А. Рынина «Ледорезы» [4], посвященная воздействию льда на опоры мостов. Во второй главе, где описаны виды и свойства льда, приводятся данные о его плотности. При этом для чистого речного льда приведен диапазон от 0,91677 до 0,9177 при 0 °С без указания источника информации. Указанные значения обобщают результаты зарубежных исследований. Для морского льда приводится результат Бунзена 0,91674, а также со ссылкой на Макарова в качестве минимальной величины указывается значение 0,848.

Наиболее значимые результаты в измерениях удельного веса речного льда были получены в то время томским профессором Б.П. Вейнбергом (рис. 1) и его учениками в 1911–1914 гг. [5–8]. Исследования удельного веса и прочности льда, предпринятые Вейнбергом, были направлены на разработку программы и методов наблюдения, которые «могли бы дать материал для предсказания срока наступления ледохода…» [5, с. 1]. Для решения этой задачи Вейнберг решил следить лишь за некоторыми физическими характеристиками льда, которые характеризуются «в обыденной речи словом “разрыхление”» [5, с. 1]. К таким характеристикам он отнес удельный вес и прочность на излом льда. Для проведения исследований им были сконструированы и изготовлены соответствующие приборы.

При создании прибора для определения удельного веса льда с самого начала большее внимание было уделено повышению точности измерений. Учитывая, что измеряемая величина удельного веса льда не может иметь значительного разброса, Вейнберг остановился на измерительной методике, включающей два измерения: веса куска льда на воздухе и веса того же куска, погруженного в жидкость, удельный вес которой незначительно отличается от удельного веса льда. Он подчеркивает, что такой метод позволяет увеличить точность измерения в случае, если для измерения веса куска льда в жидкости использовать более чувствительные весы, чем при взвешивании на воздухе. По его мнению, «точность определения удельного веса куска

льда почти равна точности определения удельного веса жидкости» [5, с. 1]. Для расчетов удельного веса льда x им была получена следующая формула:

$$x = \Delta + \frac{p}{P}(\Delta - \delta),$$

где Δ — удельный вес жидкости; p, P — вес куска льда в жидкости и на воздухе соответственно; δ — удельный вес воздуха.

В качестве жидкости Вейнберг использовал смесь равных по весу частей русского скипидара и льняного масла. Взвешивание на воздухе осуществлялось с помощью пружинных весов с общей нагрузкой 5 кг с ценой деления 100 г, которые допускали отсчет с точностью 10–20 г. Для взвешивания в жидкости использовались также пружинные весы с нагрузкой 100 г, цена деления 5 г. По ним можно было проводить измерения с точностью до 1 г. Удельный вес жидкости определялся ареометром со шкалой 0,880–0,940 и делениями 0,0005. Образцы льда приготавливались из взятых из речного льда кусков квадратного сечения со стороной примерно 20 см, от которых отпиливались куски толщиной 12–15 см. Далее этим кускам с помощью ножа придавалась примерно цилиндрическая форма. Вес экспериментальных образцов был 3–4 кг. Вейнберг утверждает, что удельный вес льда определялся с точность до 0,0002. Разработанную методику он предложил использовать для определения удельного веса любых твердых тел [9].

Исследования проводились Вейнбергом в 1911 г., при этом были получены результаты, лежащие в диапазоне 0,8747–0,9208, и в 1912 г. — 0,9006–0,9179. В 1913 и 1914 гг. измерения проводил студент Е.А. Бессонов. Им получены соответственно следующие значения удельного веса льда: 0,8957–0,9171 и 0,8848–0,9153.

Исследования, выполненные в СССР

В литературе не удалось найти ссылки на исследования удельного веса льда в первые годы после революционных событий. Возрождение интереса к исследованиям льда и, в частности, его удельного веса произошло во второй половине 1920-х гг. Во многом этот интерес был связан с развитием океанографических исследований в полярном бассейне. Большое влияние на работы отечественных ученых оказали исследования их зарубежных коллег, в первую очередь книга Ф. Мальмгрена «О свойствах морского льда», которая была опубликована в 1927 г. на английском языке. Уже 1930 г. эта книга под редакцией проф. В.В. Шулейкина была издана на русском языке [10]. Третья глава этой книги посвящена определению удельного веса льда. Для его определения Мальмгрен использовал способ гидростатического взвешивания в керосине.

В 1926 г. в Сибири измерения плотности льда соленого озера Карачи и пресного озера Узул-Куля выполнил П.С. Сарапкин [11]. Для определения плотности он использовал методику, разработанную Вейнбергом. Особый интерес эти измерения вызывают потому, что они являются одним из первых, за исключением работы С.О. Макарова, определений удельного веса соленоводного льда естественного происхождения. Для пресного льда Сарапкиным были получены значения от 0,87[1] для

[1] В своей работе П.С. Сарапкин использует термин плотность льда, но при этом указывает размерность г/см^3, которая соответствует удельному весу. Кроме этого, он указывает, что «результаты приведены к плотности воды при 4 °С» [11, с. 42]. Поэтому мы вслед за Б.П. Вейнбергом [36, с. 126] воспринимаем его данные как относительную плотность.

верхнего слоя льда, содержащего пузырьки воздуха и другие включения, и до 0,91 для нижнего прозрачного слоя. Лед на соленом озере состоял из трех различных по строению частей. Верхний слой, представляющий собой смерзшийся снег, имел плотность 0,82–0,84, средний слой — плотный не совсем прозрачный лед — 0,85, нижний слой — растущий соленый лед, состоящий из отдельных пластинок и игл, — 0,6–0,61.

Зимой 1928 г. М.Ф. Розеном на Ораниенбаумской гидрометеорологической станции были выполнены измерения удельного веса льда [12][1]. В исследовании изучался пресный лед Невской губы у Ораниенбаума. Определение удельного веса льда осуществлялось по методу Мальмгрена гидростатическим взвешиванием в керосине. Расчет осуществлялся по простой формуле:

$$S = \frac{G}{G - g} p_t ,$$

где S — удельный вес льда; G, g — вес льда на воздухе и в керосине; p_t — удельный вес керосина с поправкой на температуру.

Для определения $p_t = f(t)$, t — температура, выполнялось взвешивание 100 см^3 керосина на тех же весах при различной температуре. Результаты этих взвешиваний, отнесенные к удельному весу пресной воды при 4 °С, заносились в таблицу, которая далее использовалась для определения относительного удельного веса льда.

Работа М.Ф. Розена интересна тем, что содержит довольно подробное «морфологическое» описание исследованных образцов льда. Особое внимание было уделено описанию содержащихся во льду пузырьков воздуха. Изучение «пузыристости» (пористости) льда в ближайшем времени станет одним из основных направлений в исследовании физических свойств льда, в этом отношении работа Розена является пионерской. Он пишет: «Одной из особенностей льда является содержание в нем пузырьков газа. Пузырьки газа содержит почти каждый лед, но в разном количестве и разного вида. Эти пузырьки имеют различную форму, и они разного происхождения» [12, с. 223]. Розен указывает, что некоторая часть пузырьков образуется в момент замерзания воды из растворенного в ней воздуха. Как правило, такие пузырьки образуют нитеобразные вертикально вытянутые структуры, реже круглые или грушевидные. Он подчеркивает, что количество пузырьков зависит от скорости замерзания воды и от первоначальной насыщенности воды газом. Этот вывод он подтверждает результатами специального эксперимента по искусственному замораживанию воды, насыщенной воздухом и лишенной его. Им были получены следующие результаты: относительный удельный вес льда, полученного из воды, насыщенной воздухом при температуре –25 °С, составил 0,896, а для прокипяченной воды — 0,905. При температуре –10 и –15 °С соответственно получилось 0,899 и 0,908.

Розен указывает, что наблюдаются пузырьки вторичного происхождения, которые образуются в основном из-за выделения газа со дна водоема. Они имеют приплюснутую или плоско-выпуклую форму и относительно большой размер. Исследователь высказывает предположение, что такие пузырьки должны содержать газы, связанные с разложением биологических объектов: метан, сероводород и углекислоту.

[1] В своей работе М.Ф. Розен постоянно использует оба термина «плотность» и «удельный вес», понимая под ними относительные величины.

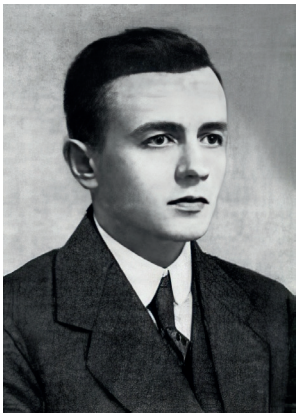

Рис. 2. Василий Владимирович Шулейкин (1895–1979)
Fig. 2. Vasily Vladimirovich Shuleikin (1895–1979)

По структуре исследованного льда Розен различает два слоя: верхний матовый, составляющий 20–25 % общей толщины и образовавшийся при смерзании снега, и более плотный — «стекловидный». Относительный удельный вес матового льда по результатам измерений составил 0,828–0,899, а «стекловидного» — 0,9–0,906, максимум — 0,912.

Важным этапом в становлении этих исследований стало создание в 1927 г. по просьбе Н.Н. Зубова и И.И. Месяцева профессором (в будущем академиком) В.В. Шулейкиным (рис. 2) методики и прибора для определения удельного веса льда [13]. В.В. Шулейкин получил инженерное образование и только потом стал специализироваться на изучении физики океана [14]. Инженерное образование способствовало разработке им более 20 оригинальных приборов для изучения физических процессов, происходящих в океане. В данной работе будут рассмотрены только два из них, предназначенные для определения свойств льда.

Оригинальность методики и прибора, предложенных В.В. Шулейкиным для определения удельного веса льда, заключалась в отказе от процедуры взвешивания. Вместо взвешивания при использовании прибора необходимо провести четыре измерения уровня жидкости в трубках, показывающих уровень жидкости. Схема прибора представлена на рис. 3.

Прибор представлял собой некоторую емкость, которая была снабжена двумя трубками, сообщающимися с объемом сосуда. В сосуд наливаются две жидкости, удельный вес которых составляет $\delta_1 > \delta_2$, причем удельный вес жидкости δ_1 должен незначительно превышать удельный вес исследуемого твердого тела, а удельный вес δ_2 — должен быть несколько меньше удельного веса тела. Для изучения льда Шулейкиным было предложено в качестве первой жидкости использовать воду (пресную или морскую), в качестве второй жидкости — керосин. Измерительные трубки расположены на емкости таким образом, чтобы каждая из них соответствовала одной из налитых жидкостей. В приготовленном к использованию приборе уровень воды установился на высоте h_0, а уровень керосина на высоте h_2. При этом показания в измерительных трубках будут для воды $h_1 > h_0$, а для керосина h_2. После добавления в прибор куска льда, который будет частично погружен в воду, а частично в керосин, уровни жидкости изменятся. Для воды будет H_1 и H_2 для керосина.

Удельный вес льда x может быть определен из следующего выражения:

$$x = \frac{\delta_1 \nu_1 + \delta_2 \nu_2}{\nu_1 + \nu_2},$$

где ν_1 — объем льда, погруженного в соответствующую жидкость: 1 — вода, 2 — керосин.

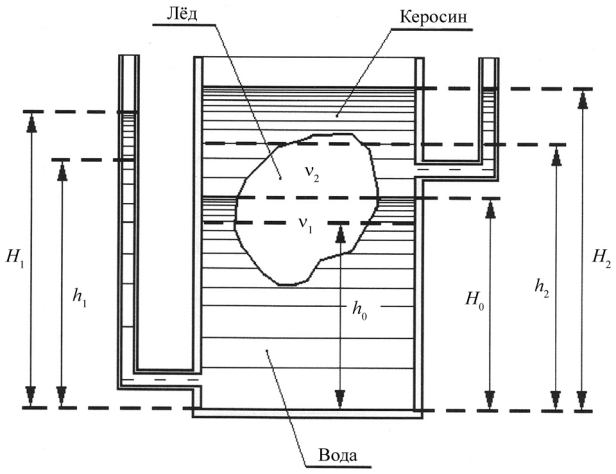

Рис. 3. Прибор В.В. Шулейкина для определения удельного веса льда

Fig. 3. V.V. Shuleikin device for ice specific weight determination

В своей работе Шулейкин показывает, что объемы куска льда, помещенного в воду и керосин, могут быть выражены через поднятие жидкости в измерительных трубках. Проведя соответствующие преобразования, он в итоге получает очень простую формулу для определения удельного веса льда:

$$x = \delta_1 \frac{a}{b},\ a = H_1 - h_1,\ b = H_2 - h_2.$$

Эта формула обладает рядом особенностей. Во-первых, в нее входит только удельный вес воды. Получаемый результат не зависит от удельного веса керосина. Во-вторых, для определения удельного веса льда используются разности показаний уровня жидкости в измерительных трубках, поэтому нет нужды учитывать возможное проявление капиллярных эффектов.

Прибор Шулейкина применялся при исследовании свойств льда, так, А.Ф. Лактионов его использовал при исследовании льда в 1929 г. во время экспедиции л/п «Седов» на Землю Франца-Иосифа [15]. Им получены важные результаты об удельном весе морского льда. Лактионов указывает, что он слабо зависит от содержания солей, при этом колебания результатов измерений варьируются от 0,851 в многолетних льдах до 0,954 во льду весеннего происхождения. Он также указывает на его за-

висимость от глубины залегания слоя льда: верхние слои льдины менее плотные. Этот прибор использовался в экспедиции на ледоколе «Красин» летом 1933 г. [16] и во время зимовки на м. Желания в 1934–1935 гг.

Исследователи, изучавшие удельный вес льда, отмечали, что наблюдаемые вариации экспериментальных данных, скорее всего, могут быть объяснены наличием в образце воздуха. На этот фактор указывал, например, Б.П. Вейнберг [6]. Как уже отмечено выше, пузырьки воздуха во льду изучал М.Ф. Розен [12]. Поэтому значительные усилия были потрачены на получение «чистого» лабораторного льда из полностью дегазированной воды [1]. Для изучения вопроса о количестве воздуха, содержащегося во льду, В.В. Шулейкиным [17] и В.И. Арнольдом-Алябьевым [18, 19] были разработаны специальные приборы.

Прибор, разработанный Шулейкиным, представлен на рис. 4. Он состоит из стакана *1* высотой 12 см и диаметром 7 см (Арнольд-Алябьев указывает, что диаметр стакана 5 см [19, с. 135]), который заканчивается конической частью. На эту коническую часть надевается пришлифованная крышка, совмещенная с бюреткой *2*, которая заканчивается краном *3* и небольшим резервуаром *5* с отверстием. По касательной к окружности стакана в его нижней части впаяна трубка *7*, которая соединена каучуковым шлангом со сферическим резервуаром *4*.

Процесс измерения объема газов в исследуемом куске льда осуществляется следующим образом. Образец льда *6* помещается в стакан, после этого устанавливается крышка с бюреткой. При открытии крана *3* в прибор начинает поступать скипидар из резервуара *4*. Шулейкин считает, что подача скипидара в прибор снизу способствует удалению с поверхности образца льда пузырьков воздуха, которые могли к ней прилипнуть. Для улучшения очистки поверхности он рекомендует поднимать вверх и опускать резервуар *4*, заставляя скипидар скользить по поверхности образца. После обмывания кран закрывается, и прибор устанавливается в теплом месте, допускается опускание стакана в теплую воду. Выделяющийся при таянии образца льда газ собирается в бюретке, и объем его может быть измерен.

Хотя публикация Шулейкина с соавторами о приборе вышла достаточно поздно, в 1931 г. (материал был сдан в редакцию «Журнала прикладной физики», который пре-

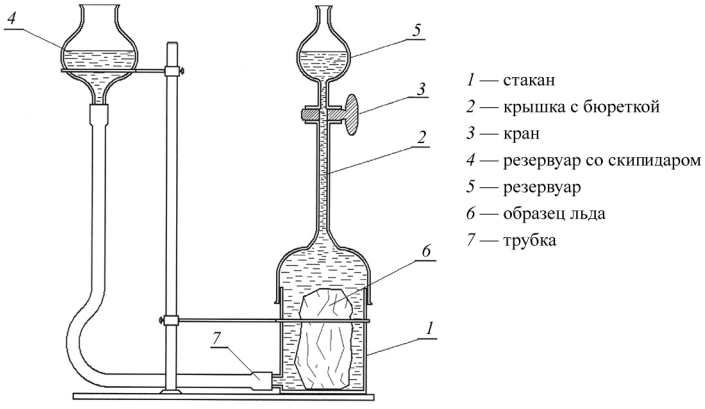

Рис. 4. Прибор, разработанный В.В. Шулейкиным, для определения объема газов, содержащихся во льду

Fig. 4. Device developed by V.V. Shuleikin to determine gas content in ice

кратил свое существование, поэтому статья перешла в новый «Журнал геофизики»), приборы, которые изготавливались в мастерских Института физики и биофизики, были доступны для исследователей. Так, Арнольд-Алябьев в 1930 г. выполнил более 50 измерений этим прибором, включая измерения в экспедиционной обстановке на ледоколе «Ермак» и экспедиционном судне «Персей» [17, 19]. В ходе выполнения работ им был выявлен ряд недостатков в конструкции прибора Шулейкина [19]:

– малый объем исследуемого образца льда;

– из-за того, что высота столба жидкости в приборе обеспечивается благодаря гидростатическому давлению, которое задается уровнем жидкости в емкости *4*, любое случайное возвышение этой емкости над краном *3* приводит к возрастанию давления и, соответственно, к подъему крышки с бюреткой;

– слабым местом прибора является каучуковый шланг, который под действием скипидара и керосина размягчается и растворяется, что приводит к его отсоединению от прибора.

Арнольдом-Алябьевым был предложен собственный прибор [18, 19], который стал выпускать Центральный институт водного транспорта. Схема этого прибора представлена на рис. 5. Этот прибор состоит из стакана *1*, который заполняется керосином или скипидаром, колокола *2* и бюретки *3* с краном *4* и вздутием *5* на одном конце. Другой конец бюретки выполняется под пробку, которая притерта к горлышку колокола.

Исследуемый образец льда вставляется в стакан с керосином, накрывается колоколом, в который как можно быстрее вставляется бюретка. При открытом кране с помощью насоса в бюретку втягивается керосин, после чего кран закрывается. При таянии образца льда выделяющийся газ собирается в верхней части бюретки и может быть измерен.

В работе [19] Арнольд-Алябьев подробно описывает методику работы со своим прибором. Например, при исследовании «рыхлого» льда, у которого объем воздуха может превышать объем бюретки, описывается последовательность действий по

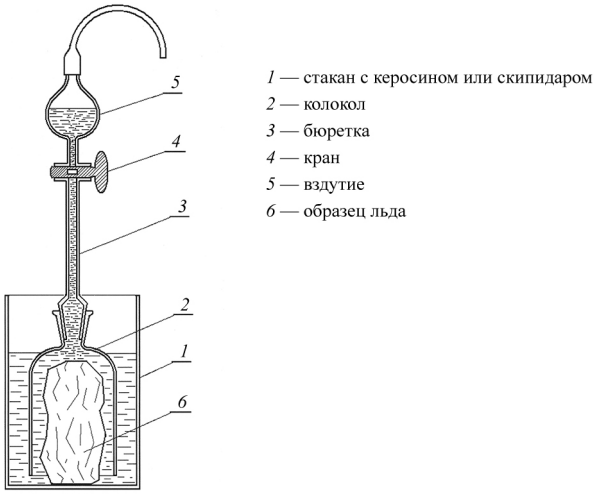

Рис. 5. Схема прибора В.И. Арнольда-Алябьева

Fig. 5. V.I. Arnold-Alyabiev device scheme

выпуску скопившегося воздуха после измерения его объема. Такая процедура может выполняться несколько раз.

Автор метода рекомендует использовать при проведении измерений парные пробы, из двух соседних мест для увеличения объема материала. Он предлагает считать результаты удовлетворительными, если расхождение между ними не превышает 10–15 %.

Арнольд-Алябьев анализирует возможные ошибки, которые могут возникать при использовании его прибора, и дает рекомендации по их устранению. Например, он определяет поправку для учета веса столба керосина в бюретке.

В.В. Шулейкин отозвался на появление приборов Арнольда-Алябьева в сноске, помещенной в статье [17, с. 183]. В ней он пишет: «В.И. Арнольд-Алябьев работал с моим прибором и затем внес в конструкцию его некоторые ухудшения». К ухудшениям Шулейкин относит следующее:

– уменьшение производительности работы прибора из-за увеличения размеров стакана;

– громоздкость прибора, его легче повредить в судовых условиях;

– сложность манипуляций с керосином, необходимость засасывать керосин в высокую бюретку;

– отсутствие смывания пузырьков газа с поверхности образца;

– объем газа определяется при давлении меньше атмосферного.

Первые три замечания Шулейкина не являются существенными, особенно о возможности повредить прибор в судовых условиях. В этих условиях прибор Шулейкина также достаточно уязвим. От смывания пузырьков газа с поверхности образца Арнольд-Алябьев принципиально отказался, считая, что жидкость должна спокойно обтекать образец, особенно для «рыхлого» льда. Арнольд-Алябьев признал последний из перечисленных недостатков и в работе [19] ввел соответствующие поправки.

С помощью приборов Шулейкина и Арнольда-Алябьева легко можно определить удельный вес льда. Для этого необходимо воспользоваться данными об удельном весе льда, полностью лишенного газовых включений. Арнольд-Алябьев использует значение, равное $N = 0{,}92$, а Шулейкин — $N = 0{,}9176$. Расчетная формула задается следующим выражением:

$$x = \frac{N}{1+V}, \qquad (1)$$

где V — количество газов, находящихся в 1 г пористого льда. Приводя указанную формулу, Шулейкин обосновывает возможность ее применения установленным им фактом равенства давления газа в полостях внутри льда атмосферному.

Формула (1) содержит ошибку[1], она должна быть записана следующим образом:

$$x = \frac{N}{1+VN}. \qquad (2)$$

Можно показать, что формула (2) совпадает с формулой Н.Н. Зубова для определения плотности льда в случае, когда объем n содержащихся в нем газов задан в процентах от объема льда [20, 21].

[1] Подробнее см. Приложение к статье.

$$\delta = \delta_0 \left(1 - \frac{n}{100}\right), \qquad (3)$$

где δ_0,δ — плотность льда лишенного пузырьков воздуха и льда, содержащего пузырьки.

Формулы (1)–(3) применимы к пресному льду, при использовании их для морского льда необходимо учитывать влияние его солености. В своей работе Шулейкин не акцентирует внимание на этом факте [17], а Арнольд-Алябьев указывает, что формула (1) может быть использована, «если принять во внимание исключительное влияние включенного в лед газа на его уд. вес и пренебречь влиянием других включений» [19, с. 145].

Серьезные критические замечания о приборах Шулейкина и Арнольда-Алябьева высказаны в статье Б.П. Брунса [22], который во время экспедиции 1934 г. на пароходе «Седов» использовал оба прибора. К недостаткам прибора Шулейкина он относит малый объем льда, который можно исследовать в этом приборе, что «при небольшом количестве пузырей или при наличии крупных пузырей не дает среднего значения газов во льду» [22, с. 80]. В этом отношении прибор Арнольда-Алябьева является более удобным. Общим недостатком приборов Брунс считает использование их авторами органических жидкостей (скипидар, керосин), применение которых основано «на неправильном предположении, что азот и кислород растворяются в них хуже, чем в воде. Действительно же оба газа менее растворимы в воде, чем в неполярных органических жидкостях» [22, с. 81], при этом он ссылается на исследования профессора И.А. Казарновского в лаборатории неорганической химии физико-химического института им. Л.Я. Карпова. Поэтому оба прибора дают содержание газа во льду с погрешностью. Брунс оценил ее в 2,5 % от объема льда, хотя и отметил, что эта оценка является завышенной. Для снижения погрешностей он использовал в приборах морскую воду при температуре таяния льда. Недостатком приборов Брунс также считал большие временные затраты на таяние льда в приборах.

При выполнении исследований Б.П. Брунса интересовал вопрос о химическом составе воздуха, находящегося во льду. Он указывал, что «для некоторых льдин можно было предполагать наличие метана, водорода и др. продуктов деятельности бактерий, если допустить, что газ попадает в лед, поднимаясь со дна мелких участков моря» [22, с. 81]. Для проведения химического анализа количество газа, собранное приборами, было недостаточно. Поэтому Брунс создал на том же принципе свой прибор, который позволял собирать газ из 15–20 кг льда. К его прибору вместо бюретки на каучуковой трубке была прикреплена стеклянная ампула, которая запаивалась после заполнения газом. Для проведения опытов кусок льда вырезался таким образом, чтобы он плотно входил в колпак для уменьшения количества воды в нем. Это делалось для того, чтобы уменьшить потери газа на его растворение в воде.

В работе Брунса для каждой из исследованных им льдин приведены таблицы, содержащие измеренные физико-механические свойства. Набор измеренных свойств для каждой льдины индивидуален. Содержание газа измерялось в $см^3$ на $дм^3$ льда при нулевой температуре и 760 мм давления. Анализ приведенных в его статье данных показывает, что диапазон содержания воздуха во льдах Баренцева моря распространялся от 0,38 до 9,15 % по объему, тем не менее Н.Н. Зубов в книге [21] указывает, что по этим измерениям лед содержал газов до 12–13 % по объему.

В.И. Арнольд-Алябьев активно использовал для проведения исследований свой прибор и способствовал его распространению в гидрометеорологических ор-

ганизациях. С помощью прибора он изучал лед Финского залива (в лабораторных условиях, содержание газов 0,7–39 см^3/кг, и на борту ледокола «Ермак», содержание газов 0–48 см^3/кг), устья Невы (содержание газов 0,6–52 см3/кг) [19], Баренцева моря (экспедиция на «Красине» 1932 г., содержание газов 30–110 см^3/кг) [19, 23] и Карского моря (экспедиция на «Малыгине» в 1934 г.) [24, 25]. В последней из указанных экспедиций было проведено 97 измерений объема газа, содержащегося во льду, полученные результаты лежали в пределах от 8 до 157 см^3/кг.

Практика измерения пористости льда в СССР показала, что прибор Арнольда-Алябьева получил большее распространение. Например, с помощью этого прибора выполнялись измерения на «Челюскине» [26]. В этой экспедиции химик П.Г. Лобза проводила измерения удельного веса льда с помощью прибора Шулейкина. Она получила для многолетнего льда значения 0,83–0,88, для годовалого — 0,88–0,92, а для молодого льда — 0,91–0,93, что хорошо согласуется с приведенными выше результатами Лактионова. Для исследования содержания воздуха во льду использовался прибор Арнольда-Алябьева. По результатам измерений его содержание в молодых льдах составило от 4,6 до 7 см^3, а в многолетних льдах — от 12 до 15,5 см^3. Также этот прибор использовал В.Б. Пиотрович на ледоколе «Красин» в 1935 г. во время экспедиции в Чукотское море [27]. Результаты своих измерений автор связал с различными типами льдов (голубой, зеленоватый и т. д.). В своих выводах он указывает, что лед Чукотского моря обладает довольно большой пористостью, причем наибольшая пористость наблюдалась у голубого льда — 55–180 см^3/кг.

Прибор использовался и для изучения ледяного покрова пресных вод: в 1933 г. Н. Фрейганг исследовал лед оз. Имандра [19]; ледовой службой Ленинградского областного управления единой гидрометеорологической службы постоянно проводились измерения «рыхлости» льда на некоторых станциях области [28]; Байкальской лимнологической станцией [29]. Прибор Арнольда-Алябьева используется и в настоящее время [30].

В 1932 г. в связи с начинающимися работами в рамках проведения Второго Международного полярного года Н.Н. Зубовым была опубликована брошюра «Некоторые свойства морского льда» [20], во многом основанная на работе [10]. Для рассматриваемой в данной работе темы наибольший интерес представляют приведенные в этой брошюре результаты расчетов плотности морского льда. Зубов предположил, что «увеличение плотности соленого льда возрастает, так как увеличивается при увеличении солености плотность морской воды» [20, с. 24], а влияние пузырьков воздуха он учитывал с помощью формулы (3). В результате им была получена таблица плотности льда в зависимости от его солености и пористости, которая затем часто использовалась.

Во второй половине 1930-х гг. определение плотности и пористости льда постепенно становится стандартным видом исследований. Этому во многом способствовало создание во Всесоюзном арктическом институте подразделения, занимающегося изучением свойств льда[1], научным консультантом которого стал проф. Б.П. Вейнберг[2] [31]. Им были разработаны планы исследований свойств льда, которые включали и исследование его пористости и плотности[3]. Эти планы стали выполнятся на различных полярных станциях, что способствовало накоплению фактического материала.

---

[1] Центральный государственный архив научно-технической документации Санкт-Петербурга (ЦГАНТД СПб). Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 173. Л. 1–4.

[2] ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 214. Л. 1.

[3] ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 215. Л. 6, 39.

В 1940 г. вышла коллективная монография под редакцией проф. Б.П. Вейнберга «Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда» [32], в которой были обобщены практически все известные к тому времени данные по свойствам льда, включая и его плотность. Так, из проведенной сводки можно узнать, что во второй половине 30-х гг. изучением плотности речного льда занимался В.К. Маклашин из Ярославского педагогического института. Результаты своих исследований он не опубликовал, но сообщил их Вейнбергу.

Данные по плотности и пористости льда стали использоваться для изучения и объяснения других физических свойств льда. Так, Шулейкин с соавторами исследовал влияние пористости на теплопроводность льда [17], а В.Л. Цуриков предпринял попытку теоретического рассмотрения зависимости прочности льда от его «полостности» [33].

Выводы

В рассматриваемый временной период изучение плотности льда развивалось в России неравномерно. До революции этими вопросами занимались лишь С.О. Макаров и Б.П. Вейнберг с учениками. Целью этих работ было получение хотя бы минимальной информации о физических свойствах льда, в то время материала плохо изученного, особенно в России. Во многом эти исследования можно расценить как попытку найти некоторое свойство льда, которое могло бы характеризовать этот материал. Вейнберг пишет об этом открыто, считая, что удельный вес позволит оценить «рыхлость» льда, которая, в свою очередь, поможет предсказать явление ледохода на реке. Тем не менее эти исследования позволили высказать ряд важных положений, например о влиянии пористости льда на его плотность.

Во второй половине 1920-х гг. в связи с расширением исследований северных морей вновь возникла необходимость в описании каких-либо физических свойств льда. Определение плотности представлялось, по-видимому, относительно простой процедурой, выполнимой в условиях экспедиции, по сравнению с определением механических или теплофизических свойств льда. Эта надежда во многом оправдалась благодаря созданию В.В. Шулейкиным и В.И. Арнольдом-Алябьевым достаточно простых приборов, позволяющих проводить исследования в полевых условиях. Эти приборы, особенно позволяющие измерять газонасыщение льда, т. к. с их помощью можно было определять и плотность, позволили существенно увеличить объем получаемой информации, а также стимулировали исследования в области текстуры и химии льда.

Постепенно изучение плотности и пористости льда стало превращаться в стандартную процедуру исследований ледяного покрова. Этому во многом способствовало развитие сети полярных станций, для персонала которых были составлены инструкции по изучению свойств льда, в которые в обязательном порядке входило определение плотности и пористости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Barnes H.T. *Ice formation*. N.Y.: John Wiley & sons. London: Chapman & Hall, Limited; 1906. 250 p.
2. Сазонов К.Е. Первые исследования прочностных свойств льда в России для нужд ледоколостроения. *Вопросы истории естествознания и техники*. 2023; 44(1): 20–36. https://doi.org/10.31857/S020596060024503-5

Sazonov K.E. Early studies of ice strength properties for the purposes of icebreaker construction in Russia. *Voprosy istorii estestvoznaniia i tekhniki = Questions of the History of Natural Science and Technology*. 2023; 44(1): 20–36. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S020596060024503-5

3. Макаров С.О. *«Ермак» во льдах*. СПб.: тип. СПб. АО печ. дела в России Е. Евдокимов; 1901. 507 с.
4. Рынин Н.А. *Ледорезы*. СПб.: Типография Ю.Н. Эрлих; 1903. 143 с.
5. Вейнберг Б.П. Приборы для быстрого и достаточно точного определения удельного веса льда и сопротивления его на излом. *Изв. Томск. техн. инст*. 1913; 29: 1–7.

   Weinberg B.P. Devices for fast and sufficiently accurate determination of the specific gravity of ice and its resistance to fracture. *Izv. Tomsk. Tekhnichesk. Inst. = Proceed. Tomsk. Tech. Inst*. 1913; 1913: 1–7. (In Russ.)
6. Вейнберг Б.П. Результаты измерения удельного веса и прочности на излом льда р. Томи перед ледоходом 1912 г. *Изв. Томск. техническ. инст*. 1913; 29: 9–11.

   Weinberg B.P. The results of measuring the specific gravity and fracture strength of ice r. Tom before the ice drift in 1912. *Izv. Tomsk. Tekhnichesk. Inst. = Proceed. Tomsk. Technical. Inst*. 1913; 29: 9–11. (In Russ.)
7. Бессонов Е.А. Исследование льда р. Томи перед ледоходом 1913 г. *Изв. Томск. техническ. инст*. 1913; 32: 1–5.

   Bessonov E.A. The study of the ice of the river Tom before the ice drift in 1913. *Izv. Tomsk. Tekhnichesk. Inst. = Proceed. Tomsk. Technical. Inst*. 1913; 32: 1–5. (In Russ.)
8. Бессонов Е.А. Исследование льда р. Томи перед ледоходом 1914 г. *Изв. Томск. техническ. инст*. 1923; 43: 26–27.

   Bessonov E.A. The study of the ice of the river Tom before the ice drift in 1914. *Izv. Tomsk. Tekhnichesk. Inst. = Proceed. Tomsk. Technical. Inst*. 1923; 43: 26–27. (In Russ.)
9. Вейнберг Б.П. К методике определения удельного веса твердых тел. *Журн. Р. Физ.-Хим. Общ*. 1911; 43: 338–339.

   Weinberg B.P. On the method for determining the specific gravity of solids. *Zhurn. R. Fiz.-Khim. Obshch. = Journal. R. Phys.-Chem. General*. 1911; 43: 338–339. (In Russ.)
10. Мальмгрен Ф. *О свойствах морского льда*. Л.: Изд. Гидро-Метеор. ком. СССР, ГОИ и Гидрограф. упр.; 1930. 90 с.
11. Сарапкин П.С. К характеристике физических свойств воды, снега и льда соленого озера Карачи и пресного озера Узул-Куля. *Омский медицинский журнал*. 1928; 3: 41–48.

    Sarapkin P.S. To the characterization of the physical properties of water, snow and ice of the salt lake Karachi and the fresh lake *Uzul-Kul. Omskii meditsinskii zhurnal = Omsk Medical Journal*. 1928; 3: 41–48. (In Russ.)
12. Розен М.Ф. Плотность льда Невской губы у Ораниенбаума и морфологическая характеристика его. *Известия Центрального Гидрометеорологического бюро ЦУМОР*. 1929; 8: 221–232.

    Rosen M.F. Density of ice in the Neva Bay near Oranienbaum and its morphological characteristics. *Izvestiya Tsentralnogo Gidrometeorologicheskogo byuro TsUMOR = News of the Central Hydrometeorological Bureau TSUMOR*. 1929; 8: 221–232. (In Russ.)
13. Шулейкин В.В. Метод определения удельного веса льда. *Журнал прикладной физики*. 1927; 4(3): 75–78.

    Shuleikin V.V. Method for determining the specific gravity of ice. *Zhurnal prikladnoi fiziki = J. Applied Physics.* 1927; 4(3): 75–78. (In Russ.)
14. Шулейкин В. В. *Дни прожитые*. 2-е изд., доп. М.: Наука; 1964. 548 с.
15. Лактионов А.Ф. О свойствах морского льда. *Труды Института по изучению Севера*. 1931; 49: 71–96.

Laktionov A.F. On the properties of sea ice. *Trudy Instituta po Izucheniiu Severa = Proceed. Institute for the Study of the North*. 1931; 49: 71–96. (In Russ.)

16. Максимов И.В. Научные работы на борту ледокола «Красин» летом 1933 года. *Бюллетень Арктического института*. 1933; 11: 334–335.

    Maksimov I.V. Scientific work on board the Krasin icebreaker in the summer of 1933. *Byulleten Arkticheskogo institute = Bull. Arctic Institute*. 1933; 11: 334–335. (In Russ.)

17. 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 the thermal conductivity of ice and its structure. *Zhurnal geofiziki = Journal of Geophysics*. 1931; 1(1–2): 179–186. (In Russ.)

18. Арнольд-Алябьев В.И. Определение полостей во льду и приборы для этой цели. *Известия Главной геофизической обсерватории*. 1930; 4: 34–36.

    Arnold-Alyabiev V.I. Definition of cavities in ice and devices for this purpose. *Izvestiya Glavnoi geofizicheskoi observatorii = News of the Main Geophysical Observatory*. 1930; 4: 34–36. (In Russ.)

19. Арнольд-Алябьев В.И. Методы определения плотности и рыхлости льда в экспедиционной обстановке. *Труды комиссии по изучению вечной мерзлоты АН СССР*. 1934; 3: 127–150.

    Arnold-Alyabiev V.I. Methods for determining the density and friability of ice in an expeditionary setting. *Trudy komissii po izucheniiu vechnoi merzloty AN SSSR = Proceed. Commission for the Study of Permafrost of the Academy of Sciences of the USSR*. 1934; 3: 127–150. (In Russ.)

20. Зубов Н.Н. *Некоторые свойства морского льда*. М.: Изд. Гидро-Метеор. ком. СССР и РСФСР; 1932. 44 с.

21. Зубов Н.Н. *Морские воды и льды*. М.: Гидрометеоиздат; 1938. 453 с.

22. Брунс Б.П. Наблюдения над процессами образования и таяния морского льда. *Труды ВАИ*. 1937; 83: 75–97.

    Bruns B.P. Observations on the formation and melting of sea ice. *Trudy VAI = Proceed.VAI*. 1937; 83: 75–97. (In Russ.)

23. Арнольд-Алябьев В.И. Научные работы Гидрометеорологического комитета на борту ледокола «Красин» в Баренцевом море зимой 1932 года. *Бюллетень Арктического института*. 1932; 7: 155–158.

    Arnold-Alyabiev V.I. Scientific work of the Hydrometeorological Committee on board the Krasin icebreaker in the Barents Sea in the winter of 1932. B*yulleten Arkticheskogo institute = Bull. Arctic Institute*. 1932; 7: 155–158. (In Russ.)

24. Арнольд-Алябьев В.И. Научные работы Карско-Ленской экспедиции на борту л/п «Малыгин» летом 1934 года. *Бюллетень Арктического института*. 1935; (5–6): 145–146.

    Arnold-Alyabiev V.I. Scientific work of the Karsko-Lena Expedition aboard the Malygin aircraft in the summer of 1934. *Byulleten Arkticheskogo institute = Bull. Arctic Institute*. 1935; (5–6): 145–146. (In Russ.)

25. Арнольд-Алябьев В.И. Мощность, строение и полостность льда Карского моря по данным экспедиции на л/п «Малыгин» в 1934 году. *Труды Арктического научно-исследовательского института*. 1938; 110: 57–81.

    Arnold-Alyabiev V.I. Thickness, structure and cavity of the ice of the Kara Sea according to the data of the expedition to the Malygin r/c in 1934. *Trudy Arkticheskogo nauchno-issledovatelskogo instituta = Proceed. Arctic Research Institute*. 1938; 110: 57–81. (In Russ.)

26. Лобза П.Г. Химия морской воды и лед полярного моря. В кн.: *Поход «Челюскина». Т.1*. М.: Изд. ред. «Правда»; 1934. С. 244–249.

27. Пиотрович В.Б. Краткие результаты гидрофизических наблюдений на ледоколе «Красин». В кн.: *Научные работы экспедиции на ледоколе «Красин»*. Л.: Изд. Главсевморпути; 1936. С. 99–111.

28. Арнольд-Алябьев В.И. Ледовая служба и Ленинградская ледовая станция Ленингр. Областного Управления единой гидрометеорологической службы. В кн.: *4-я Гидрологическая Конференция Балтийских стран: Ленинград, сентябрь 1933*. Л.: Издание ГГИ; 1933. С. 7.

29. Верещагин Г.Ю. Работы Байкальской лимнологической станции по изучению ледяного покрова Байкала. *Труды Байкальской лимнологической станции.* 1939; 9: 5–21.

Vereshchagin G.Yu. Works of the Baikal Limnological Station on the study of the ice cover of Lake Baikal. *Trudy Baikalskoi limnologicheskoi stantsii = Proceed. Baikal Limnological Station*. 1939; 9: 5–21.

30. Савельев Б.А. *Методы изучения строения, состава и свойств льда. Итоги науки и техники. Т. 4. Гляциология*. М.: ВИНИТИ; 1985. 204 с.

31. Сазонов К.Е. «Если же у нас ничего не получится…». Попытка изучения физических свойств льда Центральной Арктики в 1937–1938 гг. *Природа*. 2023; (4): 42–49. https://doi.org/10.7868/S0032874X23040051

Sazonov K.E. “If we don’t succeed…” An attempt at studying physical properties of ice in the Central Arctic: 1937–1938. *Priroda = Nature*. 2023; (4): 42–49. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S0032874X23040051

32. Вейнберг Б.П. *Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда*. М.; Л.: Гос. изд. технтеор. лит.; 1940. 524 с.

33. Цуриков В.Л. К вопросу о прочности льда. *Северный морской путь: сборник статей по гидрографии и мореплаванию*. 1940; 16: 45–74.

Tsurikov V.L. On the question of the strength of ice. *Severnyi morskoi put: sbornik statei po gidrografii i moreplavaniiu = Northern Sea Route: a collection of articles on hydrography and navigation*. 1940; 16: 45–74. (In Russ.)

Приложение

О связи между газосодержанием льда и его плотностью

При определении газосодержания льда по методам В.В. Шулейкина или В.И. Арнольда-Алябьева измеренный объем выделившихся газов относили либо к весу образца, либо к его объему. Шулейкин и Арнольд-Алябьев обычно использовали первую возможность. Именно для нее и была предложена формула (1). Необычность этой формулы современному читателю сразу бросается в глаза, т. к. в ней не соблюдается размерность величин. Попытки объяснить это несоответствие привели автора статьи к выводу формулы (2).

Прежде чем перейти к выводу формулы (2), необходимо сказать несколько слов об авторстве формулы (1). В работе [19, с. 145] Арнольд-Алябьев пишет: «Как уже было обращено внимание Шулейкиным (23) и мною (24), определение объема полостей во льду позволяет легко перейти к определению его уд. веса». В цитате числа в круглых скобках — ссылки на работы [17] и [18] соответственно. Работа [18] была опубликована раньше, чем работа [17], однако в работе [18] ничего не сказано о возможности определения удельного веса на основании данных об объеме полостей. Кроме того, в работе [19] приводится неправильная формула (1). На основании этого можно с большой уверенностью утверждать, что формула (1) была получена Шулейкиным. Возможно, во время работы с приборами Арнольду-Алябьеву пришла мысль о том, что можно по получаемым данным находить удельный вес, но саму формулу он, судя по всему, не выводил.

Рассмотрим, как может быть получена формула (2). Удельный вес лишенного воздуха льда будет определяться формулой $N = P_0/V_0$, а удельный вес льда, содержащего воздух, будет равен $x = (P_0 + P_a)/(V_0 + V_a)$, где $P_0 >> P_a$ — вес чистого льда и воздуха; V_0, V_a — объемы чистого льда и газа соответственно. Величиной P_a можно пренебречь. Объем газа, отнесенный к весу образца, будет равен V_a/P_0 . Тогда

$$x = \frac{P_0}{V_0 + \frac{V_a}{P_0}P_0} = \frac{P_0}{V_0\left(1 + \frac{V_a}{P_0}\frac{P_0}{V_0}\right)} = \frac{N}{1 + \frac{V_a}{P_0}N}.$$

Формула (2) получена, покажем, что она легко преобразуется в формулу Н.Н. Зубова (3).

$$x = \frac{N}{1 + \frac{V_a}{P_0}N} = \frac{N}{1 + \frac{V_a}{V_0 + V_a}\frac{V_0 + V_a}{P_0}N} = \frac{N}{1 + \frac{n}{100}\frac{N}{x}}.$$

Здесь n — объем газов во льду, заданный в процентах от его объема. Из полученного выражения следует:

$$x = N\left(1 - \frac{n}{100}\right).$$

Не совсем ясно, как Шулейкин совершил эту ошибку. То, что это именно ошибка, а не опечатка, следует из приведенного им в работе [17] примера расчета. По-видимому, в 30-х гг. для расчета удельного веса многие пользовались неправильной формулой. Пример ее использования можно найти в работе [24]. В ней Арнольд-Алябьев вычисляет удельный вес льда, который содержал аномальное количество газа 157 см^3/кг. Он получает значение удельного веса, равное 0,795, отмечая, что это очень низкое значение. Если расчет выполнить по формуле (2), то получим 0,804. Погрешность составляет 1,1 %.