

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ PAGES OF HISTORY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-215-233>

УДК 629.561.5



Создание теории моделирования движения судов во льдах К 70-летию первого в мире ледового опытового бассейна

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. Семьдесят лет тому назад, в 1955 г. в Арктическом институте в Ленинграде был создан первый в мире ледовый опытовый бассейн, позволяющий определять сопротивление льда движению судна с помощью моделей. Его созданию предшествовал двадцатилетний этап попыток применения модельного эксперимента к ледовым условиям. Для создания ледового бассейна потребовалось разработать физическую модель льда, а также теорию моделирования и пересчета модельных данных на натурные условия. Теория моделирования и необходимые критерии подобия были созданы трудами профессора Л.М. Ногиды и академика Ю.А. Шиманского. В настоящее время они используются во всех ледовых бассейнах мира. Окончательный выбор критериев моделирования стал возможен только после разработки В.В. Лавровым методики приготовления моделированного льда и изучения его свойств. В работе на основе архивных документов и малодоступных из-за наличия грифа секретности публикаций рассматривается история разработки критериев подобия процесса движения судна во льдах в модельных и натуральных условиях.

Ключевые слова: ледовый бассейн, критерий подобия, ледовое сопротивление, свойства льда, моделированный лед, Л.М. Ногиды, Ю.А. Шиманский, В.В. Лавров

Для цитирования: Сазонов К.Е. Создание теории моделирования движения судов во льдах. К 70-летию первого в мире ледового опытового бассейна. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(2):215–233. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-215-233>

Поступила 02.02.2025

После переработки 23.05.2025

Принята 02.04.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Developing a theory of modeling ship motion in ice For the 70th anniversary of the world's first experimental ice basin

Kirill E. Sazonov^{1,2}✉

¹ Krylov State Research Institute, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

✉K_Sazonov@ksrc.ru

 KES, 0000-0003-3364-1309

Abstract. Seventy years ago, in 1955, the world's first experimental ice basin was built at the Arctic and Antarctic Research Institute in Leningrad, enabling model-based analysis of ice resistance to ships sailing in ice-infested waters. The ice basin construction was preceded by a twenty-year period of attempts to adapt model experiments to ice conditions. These studies were undertaken by V.I. Neganov, L.M. Nogid and V.S. Nazarov. It became clear that in order to design and build an ice basin it was necessary to develop a physical ice model, as well as a theory of modeling and extrapolation of model scale data to full size. The theory of modeling and the necessary similarity criteria were developed by Professor L.M. Nogid and Academician Yu.A. Shimansky. Now these criteria are used in all the ice basins of the world. The paper considers the difference in approaches to modeling suggested by the above-mentioned researchers. The development of modeling criteria and test data scaling methods was not a short story because the choice of one or another version of theory was substantially dependent on the physical model of ice applied in the ice basin. Initially, L.M. Nogid and AARI administration thought of using an artificial ice cover made of paraffin mixed with animal oil. The final choice of modeling criteria became possible only after V.V. Lavrov had developed procedures for preparing simulated ice followed by exploration of its properties, and the feasibility of icebreakers' model tests in such ice had been proved in the Vedeneev VNIIG water tank. Based on archival documents and publications that are difficult to access due to security classification, the paper examines the history of similarity criteria development for the ship motion in ice in model and full scale. The elaboration of these criteria enabled AARI to develop and commission the first ice basin in the world.

Keywords: ice basin, similarity criterion, ice resistance, ice properties, model ice, L.M. Nogid, Yu.A. Shimansky, V.V. Lavrov

For citation: Sazonov K.E. Developing a theory of modeling ship motion in ice. For the 70th anniversary of the world's first experimental ice basin. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(2):215–233. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-215-233>

Received 02.02.2025

Revised 23.05.2025

Accepted 02.04.2025

Введение

В середине XIX в. в судостроении произошла научно-техническая революция, которая характеризовалась переходом к железу в качестве основного корпусного материала и отказом от парусов в пользу паровой машины. При этом перед судостроителями всего мира встала крайне сложная задача определения мощности энергетической установки, которая бы обеспечивала судну заданную скорость движения на чистой воде. Кроме этого, предпринимались тщетные попытки найти оптимальную по сопротивлению форму обводов корпуса судна. Только в Англии с 1838 по 1870 г. работало 8 технических комитетов, пытавшихся решить эти задачи. Ими было проведено большое количество натуральных испытаний, анализ результатов которых не позволил определить искомую форму.

Решение проблемы было найдено выдающимся английским инженером, автором первой теории бортовой качки судов Вильямом Фрудом, который создал первый в мире опытовый бассейн для проведения опытов с моделями судов [1]. Испытания моделей судов проводились до Фруда неоднократно, однако они носили качественный, сравнительный характер и не могли быть непосредственно использованы для нужд судостроения. Заслуга Фруда заключается не в том, что он построил первый опытовый бассейн, а в том, что он разработал методику проведения в нем модельных испытаний и определил порядок пересчета полученных результатов на натурное судно. Он первым понял, что не все составляющие сопротивления воды движению судна могут быть смоделированы в бассейне. Поэтому он предложил методику частичного моделирования изучаемых явлений, при использовании которой составляющие сопротивления, зависящие от силы тяжести, моделировались, а составляющие, связанные с трением жидкости о корпус, пересчитывались. Более подробно о работах В. Фруда написано в [1, 2].

Постепенно метод модельных испытаний стал распространяться в среде судостроителей. В Европе начали создаваться опытовые бассейны, четвертый в мире опытовый бассейн был создан в России в 1894 г. [3]. От этой даты отсчитывает свою историю Крыловский государственный научный центр. К 30-м гг. XX в., когда рассматриваемая в данной статье история берет свое начало, проведение модельных испытаний при проектировании судов стало в судостроении практически обязательной практикой.

Поэтому, когда в 1930-х гг. судостроители столкнулись с проблемой определения мощности или ледопроеходимости создаваемых ледоколов, возникла идея исследования процессов их движения во льдах с помощью моделей. Довоенные попытки ее реализации оказались в основном неудачными. Специалистам стало понятно, что необходимо разработать физическую модель льда, а также теорию моделирования и пересчета модельных данных на натурные условия. За прошедшие 70 лет сотрудниками ледовых бассейнов всего мира неоднократно предпринимались попытки корректировки, дополнения или изменения критериев моделирования для улучшения качества проводимых экспериментов [4]. Так что вопрос разработки теории моделирования взаимодействия различных инженерных сооружений со льдом остается актуальным. Автор надеется, что освещение истории создания существующей теории может представлять некоторый интерес и оказаться в чем-то полезным в этой работе.

Предыстория создания ледового бассейна

В начале 30-х гг. прошлого века, особенно после появления 17 декабря 1932 г. Главного управления Северного морского пути (ГУСМП) во главе с О.Ю. Шмидтом [5], активизировался процесс создания новых ледоколов для Северного морского пути (СМП). Еще до окончания челюскинской эпопеи вышло постановление ГУСМП о строительстве ледокола мощностью 18 тыс. л. с., технические характеристики этого ледокола приведены в работе [6]. Выводы, сделанные из анализа челюскинской эпопеи, показали, что для транспортного освоения СМП необходимо создание новых ледоколов и судов ледового плавания. В июле 1934 г. вышло постановление СНК СССР и ЦК ВКП(б) «О мероприятиях по развитию Северного морского пути и северного хозяйства» [7], в соответствии с которым руководство ГУСМП поставило перед судостроителями задачу создания советских ледоколов мощностью 12 и 18–24 тыс. л. с. Наблюдение за проектированием ледоколов и судов ледового

плавания осуществлялось созданной ГУСМП экспертной комиссией, в которую входили академик А.Н. Крылов, члены-корреспонденты АН СССР Ю.А. Шиманский и П.Ф. Папкович и многие другие видные судостроители.

Проектированием ледоколов занималась организация «Судопроект». При выполнении работы проектанты столкнулись с проблемой, которая аналогична описанной выше проблеме середины XIX в., а именно: не имелось никаких способов определить, какую толщину льда смогут преодолевать новые ледоколы с увеличенной, по сравнению с построенными на то время судами, мощностью. Наиболее четко эта проблема была озвучена на заседании экспертного совета ГУСМП, которое состоялось 15 июня 1935 г. в Ленинграде и было посвящено рассмотрению результатов эскизного проекта ледокола мощностью 18–24 тыс. л. с. Подробно об этом совещании нами было написано ранее [8]. Здесь же будут рассмотрены только те вопросы, которые имеют отношение к данной статье.

В заседании приняли участие два руководителя ГУСМП: С.А. Бергавинов, начальник Политического управления и заместитель О.Ю. Шмидта, и Э.Ф. Крастин, начальник управления морского и речного транспорта ГУСМП. Кроме них в совещании участвовали А.Н. Крылов, Ю.А. Шиманский, Л.М. Ногид, Э.Э. Папмель, Н.К. Кен и другие, всего 29 человек.

Одним из главных вопросов, обсуждавшихся на совещании, был вопрос о ледовых качествах нового ледокола. Выступавшие представители «Судопроекта» и других организаций указали на невозможность их определения. Это мнение поддержали А.Н. Крылов и Ю.А. Шиманский. А.Н. Крылов отметил: «...нельзя дать никаких расчетов о ледокольном качестве. Какие будут — такие и окажутся»¹.

Представитель «Судопроекта» Е.С. Толоцкий в своем выступлении сказал, что специалисты его организации хорошо понимают необходимость определения ледовых качеств проектируемого ледокола, однако имеющаяся теоретическая база не позволяет выполнить необходимые расчеты. Далее в его выступлении прозвучали слова, которые можно считать первым публичным высказыванием о необходимости создания ледового бассейна. «Мы хотели попробовать в бассейне создать искусственный лед и попробовать его ломать с помощью модели и посмотреть, как влияет изменение элементов модели». Далее Е.С. Толоцкий сообщает, что «Судопроект» «имел разговоры» по этому поводу с научно-исследовательским институтом судостроения (НИСС), который «сказал, что попробовать он сможет, но взять на себя выполнение полностью этой модели он не может, а сможет взять только вопрос исследования реальности этого задания»².

Описываемое совещание интересно еще тем, что во время его проведения А.Н. Крылов применил теорию подобия, а именно критерий Ньютона, для оценки толщины льда, которую будет преодолевать новый ледокол. По его расчетам получилось, что возрастание мощности проектируемого ледокола приведет лишь к 20–25 % увеличению толщины разрушаемого им льда. Академик так прокомментировал полученный результат: «Это следует из закона механического подобия. Если вы выразите все линейные размеры, то получите, то же самое. Если вы подсчитаете, то увидите, что громадное увеличение мощности и размеров ледокола дает ничтожный эффект в смысле его ледовых качеств»³.

¹ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 123. Л. 17.

² Там же. Л. 34.

³ Там же. Л. 35.



Рис. 1. Профессор Лев Маркович Ногид (1892–1972)

Fig. 1. Professor Lev Markovich Nogid (1892–1972)

Вопрос о возможности применения модельного эксперимента для определения ледовых качеств проектируемых ледоколов по целому ряду причин не получил дальнейшего развития. Возобновление интереса к модельным испытаниям произошло в 1941 г., когда Министерство судостроительной промышленности выдало задание на проектирование мощного ледокола, который должен был иметь «возможность форсировки... двухметрового льда непрерывным устойчивым ходом»⁴. Работы по проектированию ледокола проводились в ЦКБ-32 (бывший «Судопроект») и ЦКБ-4 (конструкторское бюро при Балтийском судостроительном заводе). В ЦКБ-32 ими руководил Л.М. Ногид [9], а в ЦКБ-4 активное участие в проектировании принимал В.И. Неганов, в будущем главный конструктор атомного ледокола «Ленин».

Перед проектировщиками стала сложная задача определения необходимой мощности главных механизмов ледокола для обеспечения его ледопроеходимости в 2 м. Для решения этой задачи специалисты обоих КБ решили прибегнуть к модельному эксперименту. Об экспериментах, выполненных В.И. Негановым, имеется очень мало информации. Известно, что они проводились в естественном льду уменьшенной толщины. Эксперименты закончились неудачей, т. к. лед оказался слишком прочным и поэтому модель не разрушала лед, а вылезала на него [10].

Больше известно об экспериментах Л.М. Ногида (рис. 1), которые были им детально описаны: «Определение мощности механизмов этого ледокола, который предназначался для необычных условий эксплуатации, явилось одной из наиболее сложных задач, подлежащих решению в этом проекте. Для проверки предпосылок, положенных в основу расчета сопротивления ледяного поля движению ледокола, выяснилась необходимость воспроизвести внешнюю картину механизма ломки льда. Было решено прибегнуть к модельным экспериментам, которые были успешно проведены инженером бюро А.С. Фишером» [9, с. 5].

⁴ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 14. Д. 314. Л. 149.



Рис. 2. Прорисовка фотографий экспериментов Л.М. Ногид и его сотрудников, выполненных в 1941 г., по [9, с. 14–15]: *a* — разрушение модельного ледяного покрова носовой оконечностью; *b* — канал, оставшийся после прохождения модели

Fig. 2. Drawing of photographs of experiments by L.M. Nogid and his colleagues, carried out in 1941 according to [9, p. 14–15]: *a* — destruction of the model ice cover by the bow end; *b* — channel left after the model passed

Для имитации в экспериментах ледяного покрова Л.М. Ногид с сотрудниками использовали новый материал — смесь стеарина с пищевым жиром в соотношении 1:2, что позволило получить качественную картину разрушения ледяного покрова корпусом ледокола. Эксперименты проводились в небольшом самодельном деревянном лотке $2 \times 1,5 \times 0,2$ м, который изнутри был выложен оцинкованным железом. Для опытов использовалась только модель носовой оконечности ледокола в масштабе 1:200. Передвижение модели выполнялось вручную. Основное внимание при проведении экспериментов уделялось фиксации картины разрушения моделированного льда носовой оконечностью модели. На рис. 2 представлены прорисовки некоторых фотографий, полученные в ходе выполнения исследований. Л.М. Ногид считал, что выполненные эксперименты реалистично отражают реальную картину разрушения ледяного покрова корпусом ледокола. Это обстоятельство позволило ему описать идеализированную схему движения ледокола во льдах, на которой он во многом основывал свои дальнейшие исследования (рис. 3). Он считал, что форштевень ледокола последовательно выламывает сектора 1–3, после чего борта начнут соприкасаться со стенками канала, в результате чего будут выломаны сектора I. Далее процесс повторяется. На основании этой схемы он ввел следующее разбиение работы, затрачиваемой на преодоление ледового сопротивления, на составляющие:

- 1) работы, затрачиваемой на разрушение ледяного покрова;
 - 2) работы, затрачиваемой на поворачивание льдин на ребро;
 - 3) работы, затрачиваемой на преодоление сопротивления воды движению льдин, перемещаемых ледоколом к стенкам канала;
 - 4) работы, затрачиваемой на придание льдинам живой силы;
 - 5) работы, затрачиваемой на затапливание льдин;
 - 6) работы, затрачиваемой на преодоление сопротивления воды движению ледокола;
 - 7) работы, затрачиваемой на преодоление трения льда о лед и льда о корпус...»
- [9, с. 7–8].

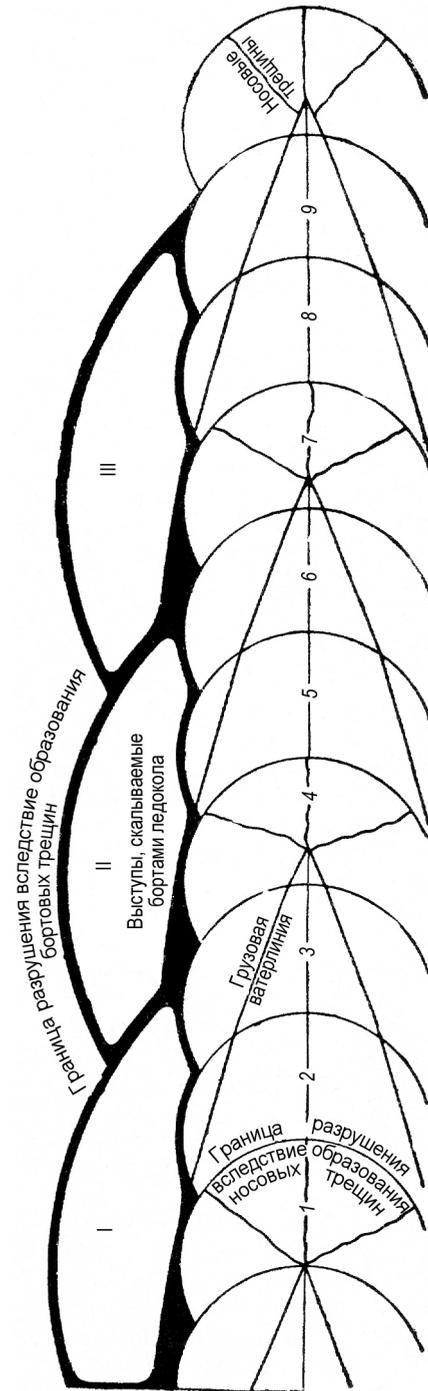


Рис. 3. Идеализированная схема движения ледокола во льдах [9, с. 8]
Fig. 3. Idealized scheme of icebreaker motion in ice [9, p. 8]

Начало войны остановило проектирование ледокола и дальнейшее проведение модельных исследований.

Необходимо отметить, что в 1939–1941 гг. был проведен ряд модельных испытаний движения судна во льдах, не связанных с проектированием новых мощных ледоколов. Такие испытания проводились для изучения характеристик новой формы носовой оконечности ледокола (обратный клин). Вначале в 1939–1940 гг. модельные исследования, благодаря содействию В.В. Шулейкина, были выполнены в бассейне Московского гидрометеорологического института. Там проводились сравнительные испытания моделей ледоколов «Ермак» и нового типа. Масштаб моделей составлял 1:100. Лед имитировался парафином. Затем в 1940–1941 гг. опыты были продолжены в опытовом бассейне Одесского института инженеров водного транспорта с парафиновыми моделями в масштабе 1:25. Лед также имитировался парафином [11]. Эти исследования не оказали существенного влияния на дальнейшее развитие теории моделирования движения судна во льдах.

Первая работа Л.М. Ногиды по моделированию

В 1945 г. в АНИИ был воссоздан кораблеисследовательский отдел⁵, который был в 1946 г. переведен из Москвы в Ленинград. Начальник этого отдела Н.П. Шандриков после возвращения начал налаживать связи с конструкторскими бюро, заводами и судостроительными научно-исследовательскими организациями города, в том числе с Ленинградским кораблестроительным институтом (ЛКИ)⁶. Можно предположить, что Ногид предложил кораблеисследовательскому отделу исследовательскую работу по лабораторному изучению ледового сопротивления ледокола в искусственных льдах в опытовом бассейне ЛКИ, которая должна была стать продолжением его экспериментов, выполненных в 1941 г. Эта работа была включена в план исследований АНИИ на 1946 г.⁷, ее начало планировалось на март, а окончание на декабрь 1946 г. В кораблеисследовательском отделе не хватало квалифицированных кадров, поэтому Л.М. Ногид начал в нем работать по совместительству.

Экспериментальную часть поставленной работы выполнить не удалось из-за того, что модель искусственного льда, предложенную в 1941 г. и хорошо себя зарекомендовавшую при испытаниях в маленьком лотке, оказалась невозможным воспроизвести в опытовом бассейне ЛКИ. Поэтому для закрытия темы Л.М. Ногидом был выполнен ряд теоретических исследований. Они были посвящены разработке теории моделирования движения судов в сплошных ровных льдах; исследованию задачи об изгибе пластины, лежащей на упругом основании, применительно к теории сопротивления льда движению ледокола; разработке практической формулы для определения ледового сопротивления ледокола. В 1948 г. эти исследования были изданы отдельной брошюрой [12].

В некоторых публикациях в Интернете⁸ можно прочитать, что Л.М. Ногид создал теорию моделирования движения судов во льдах в 1941 г. По нашему мнению, это утверждение ошибочно. Модельный эксперимент был осуществлен перед самым началом войны (на одной из фотографий в работе [12, с. 45–55] указана одна из дат

⁵ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 490. Л. 2, 4.

⁶ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 501. Л. 177, 177 об.

⁷ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 547. Л. 10.

⁸ См. статью «Ногид, Лев Маркович» в Википедии, Циклопедии, Руниверсалисе и др.

проведения эксперимента — 27 мая). Времени на его детальную обработку и тем более на разработку теории моделирования уже не было. Кроме этого, сами опыты выполнялись для изучения картины разрушения ледяного покрова носовой оконечностью ледокола, никаких измерений силовых параметров не проводилось, поэтому не было необходимости в разработке критериев моделирования. Необходимость разработки теории моделирования возникла только в 1946 г. в связи с необходимостью экспериментального определения ледового сопротивления.

В выполненной работе Л.М. Ногид предпринимает попытку найти критерии подобия при движении ледокола в сплошных ровных льдах. При их определении он использует вышеприведенное разделение ледового сопротивления на составляющие, что «дает основание, при установлении критериев подобия, базироваться на теории размерностей, не прибегая к составлению и анализу уравнений движения ледокола» [9, с. 16]. Основной составляющей ледового сопротивления он считает составляющую, связанную с разрушением ледяного покрова, который он уподобляет однородной пластине, лежащей на упругом основании. Упругие свойства такой пластины определяются модулем упругости E и коэффициентом Пуассона m . К этим параметрам он добавляет удельный вес воды ρg и толщину льда t , ρ — плотность воды. Искомой величиной является сила P . Безразмерными комплексами, обеспечивающими подобие двух рассматриваемых явлений, в этом случае будут m , $E/\rho g t$ и P/E^2 . Их анализ сразу же приводит к выводу о невозможности моделирования при использовании для этого льда, физические свойства которого идентичны естественному льду. Поэтому следующим шагом Л.М. Ногида стала формулировка требований, которым должен удовлетворять материал пластины, имитирующей ледяной покров в модельном эксперименте. С учетом сформулированных требований к материалу пластины и постоянства ускорений для модельных и натуральных условий он приходит к следующему набору критериев:

$$\frac{t}{t_0} = \frac{E}{E_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0}; \quad v = \sqrt{\lambda} v_0; \quad m = idem; \quad \rho = idem, \quad (1)$$

здесь σ — прочность льда; λ — геометрический масштаб модели; v — скорость движения. Индекс «0» относится к модели. При выполнении критериев (1) силы сопротивления для модели и натурального объекта связаны соотношением $R = \lambda^3 R_0$. Эти соотношения удовлетворяют критерию Фруда, который используется при проведении модельных испытаний на чистой воде. Таким образом, Л.М. Ногид сформулировал «строгий» набор критериев моделирования, которые до сих пор используются в работе ледовых бассейнов мира.

Соотношения (1) были получены только для одной из составляющих ледового сопротивления — прямого сопротивления, которое связано с разрушением льда. Далее в работе автор приводит правдоподобные рассуждения о том, что и другие составляющие сопротивления, может быть за исключением сопротивления воды, должны удовлетворять этим соотношениям. Для того чтобы силы трения в модельных и натуральных условиях могли бы пересчитываться по общему правилу, Л.М. Ногид вводит дополнительное требование об идентичности коэффициентов трения модели и натурального судна. Он отмечает, что, пока не разработана физическая модель моделированного льда, невозможно выяснить применимость критериев (1). Тем не менее он предлагает возможную схему проведения модельных экспериментов.

В случае, если критерии (1) окажутся неприменимы, Л.М. Ногид рассматривает два варианта «частичного» моделирования. Первый вариант заключается в замене моделирования упругих характеристик пластины, имитирующих ледяной покров, моделированием характерной длины изгиба l , т. к. процессы изгиба играют главную роль в разрушении ледяного покрова корпусом ледокола:

$$l = \sqrt[4]{\frac{Et^3}{12(1-m^2)\rho g}}. \quad (2)$$

По его мнению, такая замена позволяет несколько смягчить требования к материалу модельной пластины, т. к. не требуется выполнение «строгих» условий (1) для модуля упругости и коэффициента Пуассона.

При формулировке второго варианта «частичного» подобия Л.М. Ногид предполагает, что упругие константы m и E натурального и модельного льда одинаковы. Тогда характерные длины изгиба натурального и модельного льда связаны соотношением $l \sim t^{0,75}$. Ногид считает, что если геометрические размеры модели ледокола изменять также пропорционально $t^{0,75}$, то силы сопротивления будут связаны соотношением $R = \lambda^2 R_0$. Этот вариант «частичного» подобия он считал наиболее удачным, поэтому на его основе предложил формулы для расчета ледового сопротивления [12]. При выводе математических соотношений автором был использован целый ряд необоснованных допущений, которые не позволили в дальнейшем использовать полученные результаты.

Перед закрытием темы она была представлена на отзыв нескольким ведущим специалистам, из архивных документов следует, что ее высоко оценили известные ученые-судостроители профессор И.Г. Ханович и Ю.В. Кривцов⁹. Однако в архиве содержится еще отзыв известного гидромеханика Л.Г. Лойцанского, который, отмечая актуальность и перспективность исследований Л.М. Ногида, выдвинул ряд замечаний к теории моделирования¹⁰. Основные его замечания касались возможности применения критериев, полученных для упругой задачи, к моменту разрушения льда, а также возможности применения частичного метода моделирования с использованием характерной длины изгиба.

Создание физической модели льда

В 1935 г. во Всесоюзном арктическом институте было создано кораблеисследовательское бюро «в связи с передачей постановлением Главсевморпути тематики и средств на исследование корпусов и механизмов ледоколов во льдах»¹¹. Однако «бывшее до войны руководство Главсевморпути приняло решение о ликвидации кораблеисследовательского отдела Арктического института, и до 1945 г., по существу, вопросами полярного судостроения никто не занимался»¹². Этим же решением были практически остановлены работы института по изучению физических свойств льда, против чего на совещании по обсуждению изменений в структуре института высту-

⁹ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 547. Л. 10.

¹⁰ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 14. Д. 314. Л. 11, 11 об.

¹¹ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 121. Л. 2.

¹² ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 14. Д. 31. Л. 26.

пил А.Ф. Лактионов¹³. Восстановление работы АНИИ в области ледоколостроения и исследований физических свойств льда произошло в 1945 г. после утверждения И.Д. Папаниным нового положения об институте¹⁴.

Вновь воссозданная ледоисследовательская лаборатория одним из перспективных направлений исследований рассматривала проведение работ по созданию моделированного льда, о чем свидетельствует «Перспективный план развития ледоисследовательской лаборатории и ее тематических работ в ближайшие годы», который был составлен 8 июня 1945 г. руководителем лаборатории И.С. Песчанским¹⁵.

Вскоре после окончания войны в СССР были активизированы работы по изучению и освоению Арктики. Интерес к этой тематике со стороны руководства страны был вызван геополитическими факторами [13]. Практически все работы были засекречены.

27 июля 1947 г. вышел приказ начальника ГУСМП при СМ СССР № 219с «Об организации строительства ледоколов для Северного Морского пути». В нем были даны следующие распоряжения: «§ 6. Сосредоточить в АНИИ всю научно-исследовательскую работу по изучению условий эксплуатации судов ледового плавания; с целью дальнейшего развертывания работ усилить Кораблеисследовательский Отдел и Ледоисследовательскую лабораторию. § 7. Заместителю Начальника Главсевморпути тов. Бурханову В.Ф. для обеспечения выполнения Арктическим научно-исследовательским институтом возложенных на него научно-исследовательских работ по изучению условий эксплуатации судов ледового плавания: а) принять меры к проведению через Ленинградский Обком ВКП(б) вопросов, связанных с расширением площади Арктического института для размещения ледоисследовательских лабораторий и Кораблеисследовательского бассейна и их строительством. б) Установить размер дополнительных средств, необходимых Арктическому институту на проведение испытаний ледоколов, проектирование ледоисследовательских лабораторий и кораблеисследовательского бассейна, на их строительство и оборудование и принять меры к выделению этих средств»¹⁶. С этого момента Арктический институт стал головной организацией в области проведения исследований, связанных с плаваниями судов в ледовых условиях. Необходимо отметить, что, как это следует из приведенного документа, вопросы арктического судостроения стали рассматриваться в единой связке с ледоисследовательскими работами. Этот документ послужил основой для развертывания комплекса работ, в результате выполнения которых был создан первый в мире ледовый бассейн.

В АНИИ начались работы по созданию указанных лабораторий. Задание на проектирование ледового бассейна невозможно было составить без принятия решения о том, какая модель ледяного покрова будет использоваться при проведении экспериментов. До 1949 г. в качестве основной модели предполагалась смесь парафина с жиром, предложенная в 1941 г. Л.М. Ногидом и его сотрудниками. Об этом свидетельствуют архивные документы по разработке первоначального технического задания на проектирование ледового бассейна, относящиеся к концу 1948 г.¹⁷ Л.М. Ногид принимал самое активное участие в разработке этого задания.

¹³ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 337. Л. 12.

¹⁴ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 490. Л. 2.

¹⁵ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 545. Л. 40.

¹⁶ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 14. Д. 2. Л. 20.

¹⁷ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 685. Л. 7 и др.

Ситуация резко изменилась, когда в 1949 г. решение задачи о создании моделированного льда было найдено старшим научным сотрудником ледоисследовательской лаборатории В.В. Лавровым. Занимаясь изучением вязкости льда, он обратил внимание на то, что разброс экспериментальных результатов существенно снижается при использовании образцов льда, имеющих однородное кристаллическое строение [14]. Это обстоятельство навело его на мысль, что неудачи при испытаниях моделей судов в тонких пленках естественного льда могут быть связаны с неоднородностью их кристаллического строения. Он пишет: «При прохождении модели в этом льду ни канала, ни обломков, похожих на те, какие образуются в естественных условиях, не получается. Более того, вследствие больших усилий, требующихся для разрушения столь прочного льда, модель иногда выходит на лед всем корпусом» [15, с. 188]. В.В. Лавров делает вывод, что размер кристаллов моделированного льда должен быть изменен в соответствии с принятым масштабом изучаемого явления. Для выполнения этого условия им была предложена оригинальная методика, один из первых вариантов которой изложен в приложении к письму во ВНИИ гидротехники им. Б.Е. Веденеева¹⁸. В шугоносном лотке этого института проводились экспериментальные исследования возможности создания моделированного льда и применимости его для испытаний моделей ледоколов [16].

Основные положения методики В.В. Лаврова сводились к следующему. Для создания однородного по кристаллическому составу льда необходимо управлять процессом замерзания воды. Для этого на охлажденную неподвижную поверхность воды вносятся ядра кристаллизации одного и того же размера, для чего используется сито с заданным размером ячейки, через которое просеивают снег, иней или мелко истолченный лед. В методике указывается, что на 1 м² водной поверхности необходимо просеять примерно 30 г зародышей. В.В. Лавров отмечает: «Помимо обеспечения кристаллической однородности, а следовательно, и однообразия в механических свойствах, мероприятие внесения искусственных центров кристаллизации обеспечивает воспроизводимость полей льда данного качества, а также способствует более правильному и ровному нарастанию льда по всей длине лотка. Снижение механической прочности льда может быть достигнуто посредством растворения в воде хлористого натрия: 1 грамм соли на литр воды понижает временное сопротивление до 15 кг/см², 2 грамма — до 6–7 кг/см², 3 грамма — до 4 кг/см² и т. д.»¹⁹.

Эксперименты, проведенные в шугоносном лотке, показали перспективность предложенной методики, хотя работы по ее усовершенствованию и уточнению продолжались еще довольно долго. Также проводились планомерные исследования физических свойств моделированного льда. Методика В.В. Лаврова получила довольно высокую оценку специалистов В.Л. Цурикова и П.А. Шумского²⁰, а также руководства АНИИ, которое выдвинуло ее автора на присуждении премии им. Д.И. Менделеева²¹.

Начиная с этого момента вопрос о физической модели льда считался решенным, поэтому дальнейшие исследования вопросов моделирования движения судна во льдах исходили из этого. Работы по совершенствованию физической модели льда продолжались вплоть до пуска в эксплуатацию ледового бассейна²², они продолжают и до сих пор.

¹⁸ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 14. Д. 295. Л. 51–54.

¹⁹ Там же. Л. 52.

²⁰ Там же. Д. 300. Л. 1–4, 7–9.

²¹ Там же. Д. 295. Л. 126.

²² Там же. Д. 61. Л. 32–36; Там же. Д. 298. Л. 79–81.

Статьи Л.М. Ногида и Ю.А. Шиманского 1951 г.

Совместительство Ногида в АНИИ, по-видимому, закончилось в 1948 г., когда министром высшего образования ему это было запрещено. Попытки руководства института обратиться за помощью в решении этого вопроса к секретарю Ленинградского городского комитета ВКП(б) результата не дали²³. По всей видимости, в это время к работам, связанным с созданием ледового бассейна, был привлечен Ю.А. Шиманский [17]. В архиве имеется документ, датированный 1948 г., «Предварительный перечень работ по разработке технического задания на проектирование опытового ледового бассейна». Первый пункт этого документа — «Разработка методологии исследования движения моделей в опытовом ледовом бассейне (включая теорию подобия) и пересчета результатов испытания моделей на натуре»²⁴. Документ подписан и. о. начальника кораблеисследовательского отделения В. М. Бессудным и Ю.А. Шиманским (рис. 4).



Рис. 4. Академик Юлиан Александрович Шиманский (1883–1962)

Fig. 4. Academician Yulian Aleksandrovich Shimansky (1883–1962)

В своей работе Л.М.Ногид отмечает, что испытания моделей ледоколов в 1950 г. в шугоносном лотке проводились под руководством Ю.А.Шиманского. Начиная с 1951 г. Шиманский постоянно указывается в качестве научного руководителя большого количества научно-исследовательских тем, выполняемых кораблеисследовательским отделом АНИИ. Среди этих тем была работа, которой руководил И.И. Позняк, «Разработка методики проведения модельных испытаний ледоколов в моделированных льдах и усовершенствование технологии получения моделированного льда». В план-программе по этой теме в разделе «Состояние вопроса» было указано: «В 1949 г. Ю.А. Шиманским была создана теория моделирования движения ледокола в сплошных льдах, которая позволила приступить к модельным испытаниям в условиях опытового ледового бассейна. В 1949 г. к. т. н. В. В. Лавровым был создан моделированный лед натурального состава, разработана технология получения и изучены его физико-механические качества»²⁵.

²³ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 14. Д. 314. Л. 253–256.

²⁴ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 685. Л. 3.

²⁵ Там же. Д. 851. Л. 16, 17.

В 1951 г. в первом номере секретного выпуска журнала «Проблемы Арктики» Ю.А. Шиманский [18] и Л.М. Ногид [16] опубликовали статьи, посвященные теории моделирования движения судов во льдах. Статья Ю.А. Шиманского была подробно рассмотрена нами ранее [17], поэтому здесь будут отмечены только те ее аспекты, которые важны для развиваемой в данной статье темы.

Ю.А. Шиманский рассматривает свою работу как первое приближение к решению проблемы моделирования движения судов во льдах, в которое необходимо будет внести коррективы, основанные на данных модельных и натуральных экспериментов. В начале работы он получает условия строгого моделирования процесса движения ледокола во льдах, принимая постоянство для модели и натурального ледокола ускорения силы тяжести и плотности. Он показывает, что в этом случае силы относятся как λ^3 , кинетическая и потенциальная энергии как λ^4 и т. д. Требование удовлетворения закону куба масштаба для инерционных сил приводит к определению масштаба времени и скорости движения $\sqrt{\lambda}$. Применение условий строгого подобия ко льду приводит к требованию уменьшения прочности льда и его модуля упругости в λ раз. Этот вывод основан на предположении об упругом поведении льда вплоть до момента разрушения.

Именно это предположение в то время вызывало наибольшие сомнения. Сам Ю.А. Шиманский в рассматриваемой статье написал: «Строгое моделирование явления ломки льда ледоколом невозможно также и потому, что деформация льда не подчиняется закону Гука, причем разрушение льда сопровождается большой пластической деформацией и, следовательно, модуль упругости (E) не остается постоянным» [18, с. 100]. Поэтому в статье большое внимание уделено разработке методов приближенного моделирования, которые можно использовать в случае, если прочностные характеристики льда и его модуль упругости не удовлетворяют строгим критериям подобия. Предложенные им методики базируются на нарушении геометрического подобия для толщины льда, что позволяет сохранить соотношение сил, действующих на модель и натурное судно, равное λ^3 . Он получает следующие критерии моделирования:

$$\frac{t}{t_1} = \lambda^{4/3} \left(\frac{E_1}{E} \right)^{1/3}; \quad \frac{\sigma_p}{\sigma_{p1}} = \lambda^{1/3} \left(\frac{E}{E_1} \right)^{2/3}, \quad (3)$$

где индекс «1» относится к модели.

По мнению Ю.А. Шиманского, использование приближенного моделирования имеет свои преимущества и недостатки. Оно позволяет не подчинять прочностные свойства льда строгим критериям моделирования, так как при любых прочностных характеристиках льда соответствующим выбором толщины моделированного льда и масштаба модели можно удовлетворить заданному соотношению между силами. Главный же недостаток такого подхода заключается в отсутствии геометрического подобия для толщины льда.

В статье Ю.А. Шиманский, так же как и Л.М. Ногид, предлагает полуэмпирические соотношения для описания различных составляющих ледового сопротивления. Для описания составляющей, связанной с разрушением льда, он использует приближенное решение задачи об изгибе полубесконечной балки-полоски, отмечая при этом, что «хотя такая упрощенная схема деформации льда сильно отличается от действительных условий ломки льда корпусом ледокола, тем не менее она может быть использована

для настоящего исследования, имеющего целью изучить влияние главнейших факторов с последующим введением в полученные общие выражения поправочных коэффициентов в виде “условных измерителей”» [18, с. 102]. Сопротивление ломки определяется путем сопоставления потенциальной энергии изгиба льда с энергией его разрушения.

Ю.А. Шиманский также рассматривает составляющие ледового сопротивления, связанные с раздвиганием льда и сопротивлением воды. При этом он считает, что сопротивление воды намного меньше сопротивления раздвигания, и в дальнейшем его не учитывает. Предполагая, что сопротивление раздвигания пропорционально ширине ледокола в первой степени и обратно пропорционально коэффициенту ледорезности (коэффициент ледорезности является отношением суммарной поперечной ледовой силы к суммарной продольной силе, которые действуют на корпус судна), а также толщине льда и скорости движения ледокола в некоторых неизвестных степенях, он получает общее выражение для этой составляющей.

Особенностью этих статей являлось то, что их авторы знали о создании моделированного льда и старались представить полученные ими результаты с учетом этого обстоятельства. Физические свойства моделированного льда к моменту написания статей еще не были хорошо изучены, и возможность применения строгих критериев моделирования (1) еще оставалась под вопросом, поэтому оба автора рассматривали возможность применения частичного моделирования. Л.М. Ногид об этом прямо пишет в своей статье: «Актуальное значение в настоящее время имеет лишь вопрос о моделировании движения ледокола при частичном соблюдении критериев подобия» [16, с. 116].

Статья Л.М. Ногиды в основном посвящена демонстрации несостоятельности подхода Ю.А. Шиманского, хотя в начале ее он заявляет, что «оба предложенных метода моделирования этого явления приближенны, мы считаем несвоевременным вступать в теоретическую полемику с Ю.А. Шиманским, хотя с многими положениями в его работе мы не согласны. Такая полемика была бы пока беспочвенной, так как пригодность той или иной методики моделирования в конечном счете определяется не степенью убедительности положенных в ее основу гипотез, а практическими результатами, к которым они приводят» [16, с. 117].

Возражения Л.М. Ногиды базируются на результатах пересчета на натурные условия результатов испытаний одной из моделей ледокола, которые были выполнены в шутоносном гидротесте института гидротехники. Конкретный анализ этих результатов сейчас не имеет смысла, т. к. в расчетные выражения для прямого сопротивления у обоих авторов вкрались некоторые неточности. В статье Ногид, который был уверен в превалировании в полном ледовом сопротивлении ледокола составляющей, связанной с разрушением льда, показывает, что именно его подход демонстрирует нужный результат.

Анализ указанных статей показывает различие подходов их авторов к решению проблемы. При разработке теории моделирования Л.М. Ногид исходит из предположения, что «основное значение в полном сопротивлении льда движению ледокола имеют силы, разрушающие лед изгибом» [16, с. 116]. Ю.А. Шиманский же считает, что работа сил сопротивления льда пропорциональна потенциальной энергии балки-полоски, ширина которой равна ширине ледокола, в момент ее разрушения. Все эти различия касаются создания полуэмпирических моделей для различных составляющих ледового сопротивления и никак не влияют на формулировку строгих критериев моделирования, которые одинаковы у обоих авторов.

Общей чертой рассматриваемых работ является то обстоятельство, что и Л.М. Ногид, и Ю.А. Шиманский большое внимание уделяли влиянию модуля упругости E при анализе критериев моделирования. И тот, и другой включали этот механический параметр в полуэмпирические выражения для описания составляющей сопротивления, связанной с ломкой льда. Повышенное внимание к этой механической характеристике связано с неполнотой знаний о свойствах моделированного льда и большой ролью, которую она играет в свойствах конструкционных материалов. Впоследствии выяснилось, что, хотя удовлетворение строгим критериям моделирования для модуля упругости до сих пор представляет некоторую проблему [19], в определенной степени отклонениями этого параметра от критериев моделирования можно пренебречь, т. к. они не оказывают сильного влияния на итоговый результат.

Заключительный этап создания теории моделирования

В 1955 г. в АНИИ был запущен в эксплуатацию первый в мире ледовый бассейн. Это событие позволило не только сконцентрировать в нем работы по обеспечению проектирования новых ледоколов и судов ледового плавания, но и выполнить обширный комплекс методологических исследований, направленных на совершенствование методики моделирования и приготовления моделированного льда. Эта работа планомерно проводилась сотрудниками ледового бассейна и ледоисследовательской лаборатории АНИИ.

Примером такой работы может служить выполнение в 1958 г. темы «Проведение модельных испытаний ледоколов и судов ледового плавания» под руководством и при непосредственном участии Ю.А. Шиманского. В отчете об испытаниях отмечено: «...практика изготовления в ледовом бассейне моделированного льда показала, что отношение между временным сопротивлением льда и его модулем упругости остается постоянным при изменении толщины и прочности льда. В этом случае отпадает практическая возможность использования предусмотренного в работе 1950 г.²⁶ “приближенного моделирования”, при котором толщину моделированного льда можно изменять за счет соответствующего изменения между величинами его временного сопротивления и модуля упругости. В связи с этим в настоящей работе метод “приближенного моделирования” не излагается»²⁷.

Итог созданию теории моделирования движения судов во льдах подвели две статьи: Л.М. Ногида [19], опубликованная в 1959 г., и Ю.А. Шиманского [20], вышедшая в 1960 г. Последняя статья почти полностью воспроизводит первую главу отчета по теме «Проведение модельных испытаний ледоколов и судов ледового плавания» 1958 г.

Статья Л.М. Ногида [19] в среде судостроителей была наиболее известной, т. к. только эта публикация не имела грифа секретности. В этой работе излагается окончательный вариант строгой теории моделирования для сплошных и битых льдов. В ней исправлены недостатки предыдущих публикаций. Один из параграфов статьи

²⁶ В оригинале допущена опечатка. Возникновение этой опечатки, по-видимому, связано с тем, что в журнале, имеющем на титульном листе 1951 г. издания, в верхних колонтитулах ошибочно указан 1950 г.

²⁷ Шиманский Ю.А., Позняк И.И., Каштелян В.И., Рывлин А.Я. Проведение модельных испытаний ледоколов и судов ледового плавания (тема 3326). Ч. 1. 1958. Фонды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. С. 1–2.

автор посвящает условному подобию, т. к. он считает, что существующая физическая модель льда неидеальна по своим механическим свойствам. Поэтому учет этой неидеальности может потребовать применения частичного моделирования.

Ю.А. Шиманский в своей статье [20] приводит подробный вывод строгих критериев моделирования, исходя из условия неизменности ускорения свободного падения, а также плотности для модели и натурального объекта. Кроме этого, предполагается, что выполняется геометрическое подобие. Условное подобие он не рассматривает. В его работе сформулированы четыре показателя ледовых качеств судна: статическая и динамическая ледокольные мощности, минимальная устойчивая скорость движения судна во льдах заданной толщины и динамическая ледокольная мощность при работе судна набегами.

Далее он получает математические выражения для каждого показателя, но, прежде чем это сделать, Ю.А. Шиманский описывает общий порядок использования модельных испытаний судна для их определения. При этом он формулирует важнейшее положение методики проведения модельных испытаний в ледовых бассейнах: «...практически не представляется возможным получить в ледовом бассейне моделированный лед, механические качества и толщина которого отвечали бы достаточно точно условиям его подобия с натурным льдом. Поэтому необходимо иметь аналитические зависимости между соответствующими величинами, участвующими в явлении продвижения судна в сплошном ледяном поле, для того чтобы с помощью этих зависимостей можно было бы учесть неизбежные отклонения этих величин от их значений, определяемых точным законом подобия» [20, с. 10]. Это указание дало толчок к разработке методов корректировки данных натуральных и модельных экспериментов с целью приведения их к некоторым заданным значениям. Такие работы ведутся практически во всех ледовых бассейнах мира [17].

Еще одним применением выведенных Ю.А. Шиманским зависимостей стало их использование для приближенной оценки ледового сопротивления ледоколов и судов без проведения испытаний в ледовом бассейне, т. е. они превратились в первый широко применяемый полуэмпирический метод расчета. Работа по подбору неизвестных коэффициентов в полученных формулах была выполнена В.И. Каштеляном под руководством Ю.А. Шиманского [10, 21].

Заключение

Приведенные в данной работе материалы показывают, что создание теории моделирования судов во льдах не было одномоментным событием. Хотя применяемые ныне критерии моделирования были получены еще в 1946 г., процесс совершенствования и принятия теории продолжался более десяти лет. Основной причиной этого было на начальном этапе развития теории отсутствие физической модели ледяного покрова, которую можно было бы использовать при проведении экспериментов в ледовом бассейне. Именно этим объясняется большое внимание, которое уделялось создателями теории частичному или приближенному моделированию, т. к. при его использовании смягчались требования к материалу, имитирующему ледяной покров.

После же разработки моделированного льда основным препятствием критериев строгого моделирования являлась неопределенность, связанная с неизученностью его физико-механических свойств. Эта неопределенность не позволяла отказаться от идеи применения приближенного моделирования.

Только в результате проведения целого комплекса исследований, которые были выполнены после введения в строй ледового бассейна, была показана слабая зависи-

мость результатов экспериментов при относительно небольших отклонениях параметров льда от строгих критериев моделирования во время проведения конкретного опыта. Это позволило проводить исследования, основываясь на строгих критериях, и вводить необходимую коррекцию результатов. В окончательном виде теория моделирования и методика приготовления моделированного льда были опубликованы в 1968 г. в первой монографии, посвященной ледовой ходкости судов [10]. Исследования, направленные на совершенствование методики приготовления моделированного льда и совершенствование и дополнение системы критериев моделирования, продолжаются до сих пор.

Важным фактором при создании теории моделирования движения судов во льдах было стремление Л.М. Ногида и Ю.А. Шиманского получить не только критерии подобия, но и расчетные выражения для нахождения ледового сопротивления. Так, Л.М. Ногид, основываясь на предложенной им частичной методике моделирования, получил расчетные формулы для ледового сопротивления [12]. Также формулы для расчета были предложены Ю.А. Шиманским в работе [18]. Попытка подбора значений неизвестных коэффициентов, содержащихся в этих формулах, была в 1951 г. предпринята В.И. Каштеляном²⁸ на основании результатов экспериментов, проведенных в шугоносном лотке. Эти работы положили начало созданию полуэмпирических методов расчета ледового сопротивления.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено в инициативном порядке.

Благодарности. Автор выражает благодарность сотруднику ААНИИ И.А. Свистуну за ознакомление с рядом использованных в статье материалов и сотруднику КГНЦ Д.С. Дмитриеву за неоценимую помощь в подготовке рисунков.

Competing interests. There are no competing interests.

Funding. The study was carried out on an initiative basis.

Acknowledgments. The author expresses gratitude to the AARI employee I.A. Svistunov for the access to a number of materials used in the article and to the KSRC employee D.S. Dmitriev for invaluable assistance in preparing the figures.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Сазонов К.Е. Роль В. Фруда в создании теории корабля. *Судостроение*. 2010;5:61–66.
Sazonov K.E. The role of V. Froude in the creation of the theory of the ship. *Shipbuilding*. 2010;5:61–66. (In Russ.).
2. Готман А.Ш. К 200-летию Вильяма Фруда. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011;4(1):88–96.
Gotman A.Sh. On the 200th anniversary of William Froude. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2011;4(1):88–96. (In Russ.).
3. Гирс И.В. *Первый русский опытовый бассейн*. Л.: Судостроение; 1968. 184 с.
4. Сазонов К.Е. *Модельный и натурный эксперимент в морской ледотехнике*. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; 2021. 306 с.
5. Белов М.И. *История открытия и освоения Северного морского пути. Т. IV. Научное и хозяйственное освоение Советского Севера*. Л.: Гидрометеоздат; 1969. 616 с.
6. Виноградов И.В. *Суда ледового плавания*. М.: Оборонгиз; 1946. 239 с.
7. *Решения партии и правительства по хозяйственным вопросам. 1917–1967. Т. 2. 1933–1940*. М.: Политиздат; 1967. 797 с.

²⁸ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 14. Д. 61. Л. 19–21.

8. Сазонов К. Е. «Царь-ледокол» академика А. Н. Крылова. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2021;67(2):208–221. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-208-221>
Sazonov K.E. “Tsar icebreaker” of academician A.N. Krylov. *Arctic and Antarctic Research*. 2021;67(2):208–221. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-208-221>
9. Ногид Л.М. Моделирование движения ледокола в ледяном поле. В: *Исследования по вопросам сопротивления льда движению ледокола*. Л.: Изд-во Главсевморпути; 1948. С. 5–32.
10. Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.А. *Сопротивление льда движению судна*. Л.: Судостроение; 1968. 238 с.
11. Назаров В.С. Результаты сравнительных испытаний модели ледокола нового типа. *Морской флот*. 1946;5–6:12–15.
Nazarov V.S. Results of comparative tests of a new type icebreaker model. *Marine Fleet*. 1946;5–6:12–15. (In Russ.).
12. Ногид Л.М., Фишер А.С. *Исследования по вопросам сопротивления льда движению ледокола*. Л.: Изд-во Главсевморпути; 1948. 56 с.
13. Жуков Н.Ю. *Сталин. Проект «Арктика»*. М.: Концептуал; 2019. 480 с.
14. Лавров В.В. Вязкость льда в зависимости от температуры. *Журнал технической физики*. 1949;17(9):1027–1034.
Lavrov V.V. Ice viscosity depending on temperature. *Journal of Technical Physics*. 1949;17(9):1027–1034. (In Russ.).
15. Лавров В.В. *Деформация и прочность льда*. Л.: Гидрометеоздат; 1969. 206 с.
16. Ногид Л.М. О моделировании движения ледокола в ледяном поле. *Проблемы Арктики*. 1951;1:116–127.
Nogid L.M. On modeling the movement of an icebreaker in an ice field. *Problemy Arktiki = Arctic and Antarctic Research*. 1951;1:116–127. (In Russ.).
17. Сазонов К.Е. Вклад академика Ю.А. Шиманского в развитие арктического судостроения. *Вопросы истории естествознания и техники*. 2021;42(3):501–521.
Sazonov K.E. Contribution of Academician Yu. A. Shimansky to the development of Arctic shipbuilding. *Issues in the History of Natural Science and Technology*. 2021;42(3): 501–521. (In Russ.).
18. Шиманский Ю.А. Методика моделирования движения ледокола в сплошном ледяном поле. *Проблемы Арктики*. 1951;1: 98–115.
Shimansky Yu. A. Methodology for modeling the movement of an icebreaker in a continuous ice field. *Problemy Arktiki = Arctic and Antarctic Research*. 1951;1:98–115. (In Russ.).
19. Ногид Л. М. Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и битых льдах. *Труды Ленинградского кораблестроительного института*. 1959;28:45–62.
Nogid L.M. Modeling of vessel motion in a continuous ice field and broken ice. *Proceedings of the Leningrad Shipbuilding Institute*. 1959;28:45–62. (In Russ.).
20. Шиманский Ю.А. Теория моделирования движения судна в сплошном ледяном поле. *Труды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института*. 1960;237:9–29.
Shimansky Yu.A. Theory of modeling the motion of a vessel in a continuous ice field. *Transactions of the Arctic and Antarctic Research Institute*. 1960;237:9–29. (In Russ.).
21. Каштелян В.И. Использование модельных испытаний для определения сопротивления судна при движении в сплошных льдах. *Труды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института*. 1960; 237:30–45.
Kashtelyan V.I. Use of model tests to determine the resistance of a vessel when moving in solid ice. *Transactions of the Arctic and Antarctic Research Institute*. 1960;237:30–45. (In Russ.).