

УДК 629.124.791

EDN LBXWXP

**Н.В. Калинина, К.Д. Блинов**  
**НАСТРОЙКА ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**  
**СОПРОТИВЛЕНИЯ СПЛОШНОГО ЛЬДА ДВИЖЕНИЮ СУДОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Рассмотрена структура полуэмпирических моделей сопротивления сплошного льда движению судов. Для прогнозирования ледовой ходкости судов используются расчетные полуэмпирические методики. Полное ледовое сопротивление складывается из составляющих, описывающих разные физические процессы. Существующие полуэмпирические модели сопротивления сплошного льда движению судов нуждаются в настройке, под которой понимается получение безразмерных коэффициентов, входящих в структуру модели. Выполнено обоснование настройки полуэмпирических моделей сопротивления сплошного льда движению судов с помощью данных модельного эксперимента. Описан набор измеряемых в экспериментах параметров и способы их определения. Определены эмпирические коэффициенты для описанных моделей сопротивления. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования ледовой ходкости судов на начальных этапах проектирования.

**Ключевые слова:** сплошной лед, сопротивление движению судна, полуэмпирические модели сопротивления, суда ледового плавания, безразмерные эмпирические коэффициенты.

### Введение

Увеличение роста объема перевозок в условиях продленной навигации связано с системной модернизацией ледокольного существующего флота и строительством нового, что подразумевает расширение роли перспективных ледоколов. В процессе эксплуатации суда встречаются с разнообразными ледовыми условиями плавания. Для разрешения сложных ситуаций, связанных с дефицитом ледоколов, необходимы надежные методики прогнозирования ледовой ходкости в сложных ледовых условиях при круглогодичной навигации. Поэтому вопросы проектирования, строительства новых ледоколов и исследования вопросов ледовой ходкости для различных режимов движения остаются актуальными.

Для прогнозирования ледовой ходкости судов используют экспериментальные (натурные и модельные) исследования, а также расчетные методики (теоретические и полуэмпирические). Учитывается, что при эксплуатации ледоколов различают движение в битых, сплошных льдах и торосах. В битых льдах движение осуществляется в поле природного битого льда или в канале, проложенного ледоколом. В сплошных льдах движение ледокола осуществляется либо непрерывным ходом с постоянной скоростью, либо набегам в тяжелых льдах, когда толщина льда превышает предельную и движение непрерывным ходом невозможно [1]. Основным режимом движения ледокола в сплошных льдах является непрерывное движение носом с постоянной или переменной скоростью. Одним из показателей ледовой ходкости в таких условиях является сопротивление судна при движении с определенной скоростью.

Эмпирические и полуэмпирические методы расчета сопротивления сплошного льда разработаны многими авторами. Наилучшая сходимость результатов получается для ледоколов с размерениями и формой близким к тем, для которых разрабатывался метод и получены эмпирические коэффициенты. Наиболее полные полуэмпирические методы расчета ледового сопротивления предложены в работах Ю.А. Шиманского [2, 3], В. И. Каштеляна [4], Levis'a, Edvards'a [5], Enkvist'a [6,7], В.А. Зуева [8], Б.П. Ионова [9], Е.М. Грамузова [1]. Тем не менее, даже при наличии таких разработок, необходимо повышать точность методов прогнозирования ледопроеходимости судов. Этого можно достичь, расширяя исследования в тео-

ретическом, экспериментальном направлении и уточняя эмпирические коэффициенты с использованием накопленных данных.

### Полуэмпирические модели сопротивления сплошного льда движению судов

Сопротивление сплошного льда движению судна, по мнению подавляющего большинства исследователей, складывается из следующих независимых составляющих:

- сопротивление разрушения льда, обусловленное затратами энергии на разрушение плавающей ледяной пластины;
- статическое сопротивление обломков льда, обусловленное затратами энергии на притапливание, поворот обломков корпусом судна, образованных при разрушении плавающей ледяной пластины;
- динамическое сопротивление обломков льда, обусловленное затратами энергии на раздвигание обломков корпусом судна при движении некоторой скоростью;
- всем этим процессам сопутствует трение льда о корпус, увеличивающее сопротивление судна.

Наиболее оправданными и универсальными методами расчета являются методы, основанные на использовании полуэмпирических моделей ледового сопротивления. Суть их состоит в следующем. Полное ледовое сопротивление складывается из составляющих, описывающих разные физические процессы, например, разрушение льда, сопротивление обломков, сопротивление снега, сопутствующее трение и других. Степень детализации составляющих ледового сопротивления зависит от выбранной полуэмпирической модели.

Полное сопротивление представим в виде:

$$R = \sum_{j=1}^m k_j r_j, \quad (1)$$

где  $r_j$  – комбинация определяющих ледовое сопротивление факторов, связанная с некоторым физическим процессом, имеющая размерность силы;  $k_j$  – искомый эмпирический коэффициент.

Уравнение вида (1) линейное относительно коэффициентов называют уравнением множественной линейной регрессии.

Комбинации  $r_j$  определяют с помощью  $\pi$ -теоремы или теоретического моделирования. В разных полуэмпирических методах структура  $r_j$  отличается. Однако, в целом выражение (1) удовлетворяет теории подобия и размерностей.

Чистое ледовое сопротивление, как правило, представляется в виде суммы трех слагаемых, которые определяют различные по физической природе силы:

$$R = R_1 + R_2 + R_3,$$

где  $R_1$  – сопротивление, обусловленное разрушением ледяного покрова и трением корпуса о лед;  $R_2$  – сопротивление, обусловленное притапливанием и поворачиванием взломанного льда, а также сопутствующим трением;  $R_3$  – сопротивление, обусловленное динамикой взаимодействия с битым льдом.

В качестве примера приведем четыре полуэмпирических модели ледового сопротивления при движении судна в сплошном льду непрерывным ходом.

1. Метод В.И. Каштеляна [4]:

$$R = k_1 B \sigma_{\text{и}} h \mu_0 + k_2 \rho_{\text{л}} g B h^2 \mu_0 + k_3 B^{1,65} h v \frac{1}{\eta_2}, \quad (2)$$

где  $B$  – ширина судна;  $h$  – толщина льда;  $\sigma_{\text{и}}$  – предел прочности льда на изгиб;  $\rho_{\text{л}}$  – плотность льда;  $v$  – скорость движения;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\mu_0$ ,  $\eta_2$  – коэффициен-

ты ледокольности и ледорезности, характеризующие в интегральном виде форму корпуса в районе КВЛ.

2. Метод Levis, Edwards'a [5]:

$$R = k_1 \sigma_{\text{и}} B h + k_2 \rho_{\text{л}} g B h^2 + k_3 \rho_{\text{л}} g B h^2 \frac{v}{\sqrt{gh}}. \quad (3)$$

3. Метод Enkvist'a [11]

$$R = k_1 \sigma_{\text{и}} B h + k_2 \rho_{\text{л}} g B h T + k_3 \rho_{\text{л}} B h v^2, \quad (4)$$

где  $T$  – осадка судна.

4. Метод В.А. Зуева [8]:

$$R = k_1 \frac{\sigma_{\text{и}}^2}{E r} B h^2 + \rho_{\text{л}} g B h^2 \left( k_2 \frac{B}{h} + k_3 Fr_h + k_4 Fr_h^2 \right), \quad (5)$$

где  $Fr_h = \frac{v}{\sqrt{gh}}$  – число Фруда по толщине льда;  $E$  – модуль упругости, кПа;  $r \approx \frac{1}{\alpha}$  – радиус

концентрической трещины;  $\alpha = \sqrt[4]{\rho g / d}$  – параметр изгиба пластины на упругом основании;  $\rho$  – плотность воды;  $d = \frac{E h^3}{12(1-\mu^2)}$  – цилиндрическая жесткость ледяной пластины;  $\mu$  – коэффициент Пуассона льда. Здесь динамическая составляющая сопротивления обломков представлена третьим и четвертым слагаемыми.

Безразмерные коэффициенты  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  определяются по данным натуральных или модельных испытаний.

Приведенные методы расчета сопротивления В.И. Каштеляна (2), Levis'a и Edwards'a (3), Enkvist'a (4), В.А. Зуева (5) не учитывают форму корпуса ледокола. Метод В.И. Каштеляна учитывает форму носовой оконечности судна при помощи коэффициентов ледокольности  $\mu_0$ -и ледорезности  $\eta_2$  [4]. Во всех методах не учитывается наличие на ледяном покрове снега, который, как показывают натурные данные, значительно влияет на сопротивление. Недостаточно полно учитываются механические характеристики льда. Методы не учитывают в явном виде коэффициент трения льда о корпус ледокола.

В методах В.И. Каштеляна, Levis и Edwards, Enkvist'a доля ледового сопротивления, связанная с разрушением льда  $R_p$  сильно занижена. Это связано с недостаточно точными математическими моделями разрушения ледяного покрова, положенными в основу расчетных методов. Естественно, что несоответствие структуры ледового сопротивления может приводить к неправильной оценке методов снижения ледового сопротивления. Но для построения полуэмпирических моделей расчета ледового сопротивления исследуются описанные методы расчета.

### Определение эмпирических коэффициентов в моделях сопротивления льда движению судов

Для настройки полуэмпирических моделей сопротивления необходимо определить  $k_j$ , используя экспериментальные данные. Надежность определения коэффициентов  $k_j$  существенно зависит от количества и качества экспериментальных данных, а также обоснованного выбора полуэмпирической модели. Считается, что наилучшие экспериментальные данные – это данные натурального эксперимента. Однако здесь для ледоколов возникают трудности. Натурный эксперимент для судов ледового плавания это, как правило, попутный эксперимент без выведения судна из эксплуатации. Поэтому задать ледовые условия не удастся. Кроме того, не удастся достаточно тщательно измерить физико-механические характеристики входящие в комбинации  $r_j$ .

В модельном эксперименте следует измерять все физико-механические характеристики, присутствующие в выбранной полуэмпирической модели. Для этого могут использоваться различные модели ледяного покрова, не полностью удовлетворяющей классической теории моделирования [1]. Ширина модели и коэффициенты ледокольности и ледорезности из-

вестны до начала модельных испытаний. Особенно тщательно необходимо измерять толщину модели ледяного покрова. Ее измеряют в нескольких точках по длине проложенного канала, а затем осредняют. В нескольких точках известными способами измеряют предел прочности льда на изгиб. Плотность льда определяют путем взвешивания льдинки вместе сосудом, в котором она плавает свободно и в притопленном состоянии на высокоточных весах. Скорость и сопротивление модели измеряются с помощью приборов буксировочной системы бассейна.

Для получения корреляционных коэффициентов полуэмпирических моделей рекомендуется использование двух и более моделей с различными формами корпуса. Зимой 2023 г. были проведены экспериментальные исследования моделей ледоколов проектов 16, 1105, 1191, 21900 при движении в сплошном естественном тонком льду [10, 11] непрерывным ходом в ледовом опытовом бассейне НГТУ с целью получения значений эмпирических коэффициентов для различных моделей сопротивления. Основные характеристики исследуемых судов приведены в табл. 1. Модели судов выполнены в масштабе в соответствии с теоретическим чертежом голого корпуса и окрашены акриловой двухкомпонентной эмалью. Для указанных проектов ледоколов изготовлены модели в различных масштабах. Характеристики моделей ледоколов приведены в табл. 2, внешний вид моделей на рис. 1...4. Фрагменты испытаний моделей приведены на рис. 5...8.

Для определения эмпирических коэффициентов было произведено обследование генеральной совокупности и путем выбраковки экспериментальных данных с наибольшими относительными расхождениями по сопротивлению и скорости получены выборочные совокупности для определения эмпирических коэффициентов приведенных полуэмпирических моделей сопротивления сплошного льда (2)...(5), отобранные хотя и направлено, но в конечном итоге случайным образом. Результаты автоматизированных расчетов эмпирических коэффициентов приведены в табл. 3. Они рассчитывались методом наименьших квадратов с использованием экспериментальных данных по указанным моделям ледоколов. Использование экспериментальных данных сразу по четырем проектам сделано не случайно, а для максимального изменения основных определяющих факторов, в частности толщины льда и формы корпуса ледоколов. В экспериментальных данных содержится вся необходимая информация по характеристикам льда, которая заложена в моделях. Часть характеристик модельного льда была измерена в процессе лабораторных опытов:  $E$ ,  $h$ ,  $\rho$ ,  $\rho_l$ .

Плотность воды  $\rho$  определялась при помощи ареометра, а плотность льда  $\rho_l$  гидростатическим взвешиванием [12]. Толщина льда  $h$  измеряется штангенциркулем в 3 – 5 точках по длине проложенного канала сразу после прохода модели. Коэффициент трения пары корпус судна – ледяной покров  $f$  определяется буксировкой корпуса модели по замороженному модельному ледяному покрову (рис. 9). Принятые в расчетах значения:  $E = 5 \cdot 10^6$  кПа;  $\rho = 1$  т/м<sup>3</sup>;  $\rho_l = 0,91$  т/м<sup>3</sup>;  $f = 0,05$ . Часть характеристик модельного льда была задана по статистическим данным:  $\mu = 0,33$ ,  $\sigma_{\mu} = 600$  кПа [8].



Рис. 1. Модель ледокола проекта 16



Рис. 2. Модель ледокола проекта 1105

**Таблица 1.**  
**Основные характеристики судов**

Характеристики	Размерность	Номер проекта			
		16	1105	1191	21900
Класс судна		«❖ О2,0 (ледокол)»	«❖ ЭМ2 (ледокол)»	«❖ М-ПП 2,5 (ледокол)»	КМ ❖ Icebreaker6
Длина судна по КВЛ $L_{\text{КВЛ}}$	м	44,7	71,0	73,0	114,0
Ширина судна по КВЛ $B$	м	11,4	16,0	16,0	28,02
Высота борта $H$	м	4,0	4,8	4,6	12,4
Осадка $T_{\text{max}}$	м	2,72	3,5	2,5	8,5
Водоизмещение $D$	т	777	2472	2180	14300
Мощность $N$ - на фланцах двигателей - на гребных валах	кВт	1325 960	4650 3300	4815 3800	21000 16400
Тяга на швартовах	кН	110	414	410	1640
Скорость судна на чистой воде $v$		18,0 км/ч	25,7 км/ч	25 км/ч	16 уз.
Предельная толщина преодолеваемого льда	см	35-40	70 +30 см снега	70	100

**Таблица 2.**  
**Характеристики моделей ледоколов**

Характеристики	Размерность	Номер проекта			
		16	1105	1191	2190
Масштаб модели		1:35	1:50	1:50	1:100
Длина модели по КВЛ $L_{\text{КВЛ}}$	м	1,28	1,42	1,46	1,14
Ширина модели по КВЛ $B$	м	0,33	0,32	0,32	0,28
Осадка модели $T_{\text{max}}$	м	0,078	0,070	0,050	0,085
Масса модели	кг	18,1	19,8	17,4	14,3
Скорость модели судна на глубокой тихой воде	м/с	0,85	0,98	0,98	0,82
Скорость модели в предельном льду	м/с	0,07	0,12	0,07	0,15



**Рис. 3. Модель ледокола проекта 1191**



**Рис. 4. Модель ледокола проекта 21900**



Рис. 5. Движение модели ледокола проекта 16 во льду толщиной 2,72 мм



Рис. 6. Движение модели ледокола проекта 1105 во льду толщиной 3,38 мм



Рис. 7. Движение модели ледокола проекта 1191 во льду толщиной 2,14 мм



Рис. 8. Движение модели ледокола проекта 21900 во льду толщиной 1,74 мм



Рис. 9. Буксировка корпуса модели по льду для определения коэффициента трения

В табл. 4 также приведены значения эмпирических коэффициентов, полученные авторами моделей с целью сравнения полученных результатов.

Таблица 3.

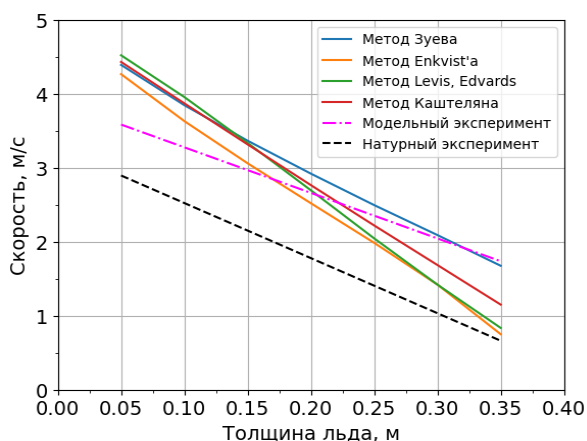
Значения эмпирических коэффициентов по данным модельных испытаний в НГТУ

Метод	Эмпирические коэффициенты			
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
Метод В.И. Каштеляна (2)	0,024	0,375	0,18	-
Метод Levis, Edwards'a (3)	0,043	0,12	21,00	-
Метод Enkvist'a (4)	0,041	1,87	1,06	-
Метод В.А. Зуева (5)	6023	0,02	0,29	1,31

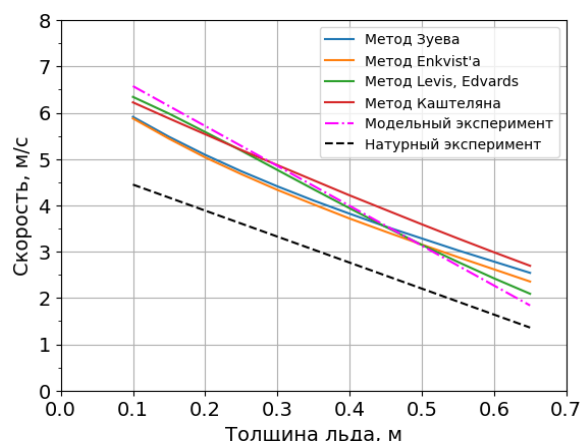
**Таблица 4.**  
**Значения эмпирических коэффициентов, полученные авторами методов [10, 9, 2, 5]**

Метод	Эмпирические коэффициенты			
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
Метод В.И. Каштеляна (2)	0,004	3,6	0,25	-
Метод Levis, Edvards'a (3)	0,019	3,455	4,68	-
Метод В.А. Зуева (5)	6060	0,075	3,6	0,84

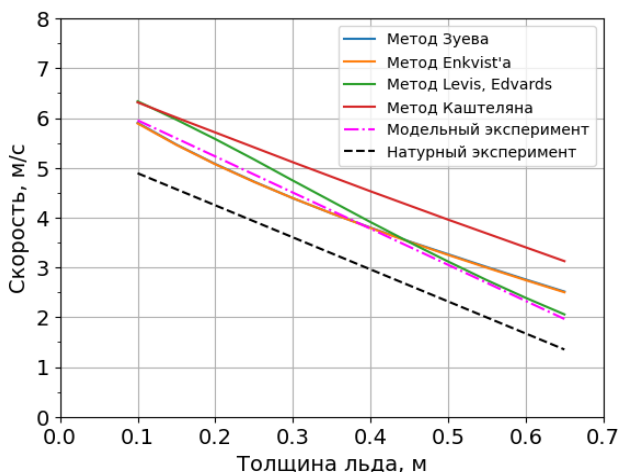
Несовпадение объясняется следующим образом. Вновь полученные коэффициенты настраивались на данные испытаний моделей судов, а ранее полученные коэффициенты с использованием модельных и натурных испытаний судов других проектов. В полученных данных процентное соотношение долей составляющих сопротивления изменилось. Доля на сопротивление, связанное с разрушением льда, выше, чем доля сопротивления, обусловленная динамикой взаимодействия с битым льдом. Это обусловлено особенностями взаимодействия модели судна при движении в сплошном льду, где доля составляющей сопротивления играет основную роль, а сопротивление обломков занижено. Используя уточненные эмпирические коэффициенты для разных методов определения сопротивления (2), (3), (4) и (5) были построены диаграммы ледопроеходимости для четырех проектов ледоколов (рис. 10, 11, 12, 13). Для сравнения на рис. 10, 11, 12, 13 нанесены диаграммы ледопроеходимости, полученные в ходе модельных и натурных экспериментов [1, 13].



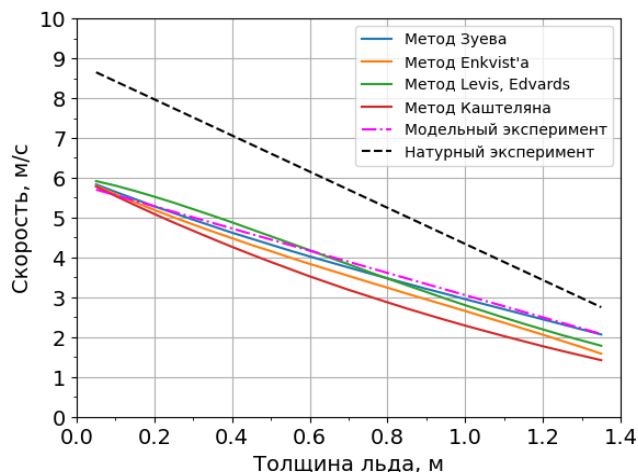
**Рис. 10. Диаграммы ледопроеходимости ледокола проекта 16**



**Рис. 11. Диаграммы ледопроеходимости ледокола проекта 1105**



**Рис. 12. Диаграммы ледопроеходимости ледокола проекта 1191**



**Рис. 13. Диаграммы ледопроеходимости ледокола проекта 21900**

При накоплении экспериментальных данных эмпирические коэффициенты могут уточняться. Увеличение количества и повышение качества данных модельного эксперимента приводит к повышению надежности  $k_1, k_2, k_3, k_4$ , а следовательно, и методики расчета сопротивления в сплошном льду. То есть, приведенные полуэмпирические модели (2)...(5) следует рассматривать в единстве с используемыми экспериментальными данными.

### Заключение

Рассмотрена структура некоторых полуэмпирических моделей сопротивления сплошного льда движению судов. Выполнено обоснование настройки полуэмпирических моделей сопротивления сплошного льда движению судов с помощью данных модельного эксперимента. Описан набор измеряемых в экспериментах параметров и способы их определения. Определены эмпирические коэффициенты.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования ледовой ходкости судов на начальных этапах проектирования.

*Представленные результаты получены по проекту РНФ № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полуэмпирических моделей взаимодействия судов со льдом».*

### Библиографический список

1. **Ионов, Б.П.** Ледовая ходкость судов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2013. – 504 с.
2. **Шиманский, Ю.А.** Теория моделирования движения судна в сплошном ледяном поле // Сб. науч. тр. – Л.: ААНИИ, 1960. Т. 237. С.39-29.
3. **Шиманский, Ю.А.** Условные измерители ледовых качеств судов / Ю.А. Шиманский. – Л.: Изд-во Главсевморпути, 1938. – 60 с.
4. **Каштелян, В.И.** Сопротивление льда движению судна / В.И. Каштелян, И.И. Позняк, А.Я. Рывлин. – Л.: Судостроение, 1968. – 238 с.
5. **Edwards R.Y.** at al. Full Scale and Model Tests of a Great Lakes Icebreaker / R.Y. Edwards at al. // The society of Naval Architects and Marine Engineers. 1972. Vol. 80. Pp.1-31.
6. **Enkvist E.** Ice model tests as a ship design tool // Proceedings of the IAHR Ice Symposium, 1990. Vol. 1. Pp. 15-42.
7. **Enkvist E.** On the ice resistance encountered by ships operating in the continuous mode of icebreaking // The Swedish academy of engineering sciences in Finland, Rep. № 24. Helsinki, 1972. – 181p.
8. **Зуев, В.А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 207 с.
9. **Ионов, Б.П.** Ледовое сопротивление и его составляющие / Б.П. Ионов – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 80 с.
10. **Блинов, К.Д.** Экспериментальное исследование ледового сопротивления модели ледокола проекта 21900 в опытовом бассейне / К.Д. Блинов, А.Г. Ларин, М.А. Панченко, М.А. Панакушин // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3. Часть 3. Полярная механика. С. 71-76.
11. **Панакушин, М.А.** Прогнозирование ходкости речного ледокола проекта 1105 с использованием модельного эксперимент / М.А. Панакушин, А.Г. Ларин, К.Д. Блинов, М.А. Панченко // Морские интеллектуальные технологии 2023. № 3. Часть 3. Полярная механика. С. 88-93.
12. **Ногид, Л.М.** Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и битых льдах / Сб. науч. тр. – Л.: ЛКИ, 1959. Вып. 28. С.179-185.
13. **Сазонов, К.Е.** Модельный и натурный эксперименты в морской ледотехнике / К.Е. Сазонов. – СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2021. – 308 с.