

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ СУДОВ

АРКТИЧЕСКИЙ РЕГИОН ОЧЕНЬ БОГАТ ПОЛЕЗНЫМИ ИСКОПАЕМЫМИ. ИДЕТ АКТИВНОЕ ОСВОЕНИЕ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ. НО ТАКЖЕ ТРЕБУЕТСЯ ФОРМИРОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ. АКТУАЛЬНОЙ ЯВЛЯЕТСЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТИ И ГАЗА С АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА ПО СЕВЕРНОМУ МОРСКОМУ ПУТИ В РАЗЛИЧНЫХ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ. ВОЗНИКАЕТ НЕОБХОДИМОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАТЬ ВРЕМЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕЙСОВ, ИССЛЕДОВАТЬ ЛЕДОВУЮ ХОДКОСТЬ СУДОВ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ ПРИ КРУГЛОГОДИЧНОЙ НАВИГАЦИИ. ПОКАЗАНО, ЧТО ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ СУДОВ ИСПОЛЬЗУЮТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПЫТОВОМ БАССЕЙНЕ И РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДИКИ (ЭМПИРИЧЕСКИЕ ИЛИ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЕ). ПРИВЕДЕНЫ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЧИСТОГО ЛЕДОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ СУДОВ В БИТЫХ И СПЛОШНЫХ ЛЬДАХ, СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ НАБЕГАМИ В СЛОЖНЫХ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ. ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЗВОЛЯЮТ ПРОГНОЗИРОВАТЬ ХОДКОСТЬ ЛЕДОКОЛОВ И СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*THE ARCTIC REGION IS VERY RICH IN MINERALS. ACTIVE DEVELOPMENT OF THE ARCTIC ZONE IS UNDERWAY. THE FORMATION OF A LOGISTICS SYSTEM IS REQUIRED. TRANSPORTATION OF OIL AND GAS FROM THE ARCTIC SHELF ALONG THE NORTHERN SEA ROUTE IN VARIOUS ICE CONDITIONS IS RELEVANT. THE NEED TO PREDICT THE TIME OF VOYAGES, TO STUDY THE ICE PROPULSION OF SHIPS IN VARIOUS ICE CONDITIONS DURING YEAR-ROUND NAVIGATION ARISES. STUDIES IN THE EXPERIMENTAL BASIN AND CALCULATION METHODS (EMPIRICAL OR SEMI-EMPIRICAL) ARE USED TO PREDICT THE ICE PROPULSION OF SHIPS, AND THIS IS SHOWN IN THE ARTICLE. MATHEMATICAL MODELS OF PURE ICE RESISTANCE DURING THE MOVEMENT OF SHIPS IN BROKEN AND SOLID ICE, THE AVERAGE SPEED OF MOVEMENT BY RAIDS IN DIFFICULT ICE CONDITIONS ARE GIVEN. THE PRESENTED RESEARCH RESULTS MAKE IT POSSIBLE TO PREDICT THE ICE PROPULSION OF ICEBREAKERS AND ARCTIC SHIPS AT THE DESIGN STAGE*

Ключевые слова: транспортировка нефти и газа, Северный морской путь, ледовые условия, ледоколы, суда ледового плавания, исследования и прогноз ледовой ходкости судов, математические модели ледового сопротивления и скорости движения, экспериментальные исследования.

## Калинина Надежда Викторовна

и.о. заведующего кафедрой «Кораблестроение и авиационная техника», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, к.т.н., доцент

Арктический регион очень богат нефтью, газом и другими полезными ископаемыми. В настоящее время здесь добывается десятая часть общемировых объемов нефти и четверть – природного газа. Идет активное освоение арктической зоны. На российском Крайнем Севере сосредоточено 80% всей арктической нефти и практически весь газ [7].

Россия имеет технологии, позволяющие добывать углеводороды в Арктике. К 2050 году примерно 30 процентов всех углеводородов будет добываться в Арктике. Но также требуется формирование логистической системы. При изменении климата период навигации в арктической зоне будет увеличен, а Северный морской путь будет использоваться гораздо интенсивнее, и это экономически целесообразно [8].

Но при этом необходимо прогнозировать время выполнения рейсов, так как суда в ледовых условиях движутся медленнее, чем в чистой воде.

В Арктике себестоимость разведки, добычи, возведения инфраструктуры существенно выше, чем в других регионах. Это связано с климатическими условиями, с удаленностью, со сложностью мобилизации ресурсов, с логистикой. Транспортировка нефти и газа по Северному морскому пути позволит снизить их себестоимость, но для этого необходим флот, который обеспечит круглогодичную навигацию. Ледовые условия, в которых эксплуатируются суда, разнообразны. Постоянно возникают сложные ситуации при проводке судов из-за дефицита ледоколов. Поэтому вопросы исследования и прогнозирования ледовой ходкости судов ледового плавания и ледоколов в сложных ледовых условиях при круглогодичной навигации остаются актуальными.

Для прогнозирования ледовой ходкости судов используют экспериментальные исследования, а также расчетные методики (эмпирические или полуэмпирические).

Движение судов неарктического ледового класса по СМП осуществляется в весенне-летний период

преимущественно в природных мелкобитых льдах или в канале битого льда при проводке ледоколов в осенне-зимний период. Для прогнозирования скорости движения в битом льду различной толщины и сплоченности имеются методики расчета сопротивления [3].

Чистое ледовое сопротивление битого льда можно рассчитать эмпирическим методом В.А. Зуева [3] для различной толщины льда и сплоченности:

$$R = \rho_l g B h^2 \left( 0,13 \frac{B}{h} + 1,3 F r_h + 0,5 F r_h^2 \right) \bar{s}^2 (2 - \bar{s}), \quad (1)$$

где  $\rho_l$  – плотность льда, т/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $B$  – ширина ледокола, м;  $h$  – толщина льда, м;  $F r_h = v / \sqrt{g h}$  – число Фруда по толщине льда;  $v$  – скорость движения, м/с;  $\bar{s}$  – функция сплоченности льда в канале. Метод (1) настроен на суда неарктического ледового плавания, среднего водоизмещения и не учитывает форму корпуса.

Из полуэмпирических методов для прогнозирования чистого ледового сопротивления битого льда в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева (НГТУ) разработан метод Н.В. Калининой [3]. При движении ледокола в собственном канале битого льда чистое ледовое сопротивление складывается из: импульсного сопротивления  $R_1$ , обусловленного потерей кинетической энергии судна при ударах о льдины; диссипативных сил сопротивления  $R_2$ , связанных с рассеиванием энергии движущегося судна, которые можно представить в виде суммы двух слагаемых: диссипативной составляющей, возникающей вследствие сопротивления воды раздвиганию льдин и диссипативной составляющей, обусловленной трением льдин друг от друга; сопротивления  $R_3$ , обусловленного притапливанием и поворачиванием льдин:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = k_{ид} \left( c_n \rho_l h \frac{B}{2} v^2 (\Phi_n + f \Phi_{нт}) + c_r \rho_l v^2 h \frac{B}{2} (\Phi'_n + f \Phi'_{нт}) \right) + k_n (\rho - \rho_l) g h b B (\Phi'_n + f \Phi'_{нт}); \quad (2)$$

$$\Phi'_n = \frac{2}{B} \int_{L_{вл}} n_x^3 dL_{вл}; \quad \Phi'_{нт} = \frac{2}{B} \int_{L_{вл}} n_x^2 \sqrt{1 - n_x^2} dL_{вл};$$

$$\Phi'_n = \frac{2}{B} \int_{L_{вл}} n_z n_x dL_{вл}; \quad \Phi'_{пт} = \frac{2}{B} \int_{L_{вл}} n_z \sqrt{1 - n_x^2} dL_{вл},$$

где  $c_n$  – безразмерный коэффициент, учитывающий присоединенные массы воды в составе импульсного сопротивления льдин,  $c_n = 1 + \frac{0,068}{h \alpha} \frac{\rho}{\rho_l}$ ;  $v$  – скорость

судна;  $c_r = 2$  – коэффициент гидродинамического сопротивления при раздвигании льдин;  $\rho$ ,  $\rho_l$  – плотность воды и льда, т/м<sup>3</sup>;  $b$  – средняя протяженность обломков льда, зависящая от его толщины, как показывают наблюдения, она определяется изгибом пластин на упругом основании и приближенно может быть принята из соотношения  $b \alpha = 0,312$ ;  $\alpha = \sqrt[4]{\rho g / d}$  – параметр изгиба пластины на упругом основании;  $d = \frac{E h^3}{12(1-\mu^2)}$  – цилиндрическая жесткость ледяной пластины;  $f$  – коэффициент трения льда о корпус судна;  $\mu$  – коэффициент Пуассона льда;  $E$  – модуль упругости, кПа;  $n_x$ ,  $n_z$  – направляющие косинусы внешней нормали к обшивке судна с продольной  $Ox$  и вертикальной  $Oz$  осями;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  – углы наклона батокса к горизонту, ватерлинии к диаметральной плоскости и шпангоута к вертикали в некоторой точке судовой поверхности;  $\varphi_{1ф}$ ,  $\varphi_{2ф}$ ,  $\varphi_{3ф}$ ,  $n_{xф}$ ,  $n_{zф}$  – углы и направляющие косинусы на форштевне в районе действующей ватерлинии;  $\alpha-d-\rho$ ,  $\rho_l$ ,  $\rho_{сн}$  – плотность воды, льда и снега, т/м<sup>3</sup>;  $k_n = 0,70$ ,  $k_{ид} = 1,38$  – эмпирические коэффициенты, компенсирующие неточности теоретической модели сопротивления и настроенные на натурные экспериментальные данные;  $n_x$ ,  $n_z$  – косинусы углов между нормалью к обшивке в месте контакта с продольной и вертикальной осями соответственно, которые однозначно связаны с углами наклона батоксов  $\varphi_1$ , ватерлиний  $\varphi_2$  и шпангоутов  $\varphi_3$ .

Полуэмпирическая модель сопротивления (2) учитывает не только главные размерения судов, но и форму корпуса, физико-механические характеристики льда. Форма корпуса учтена путем введения в расчетные модели интегральных функций геометрии  $\Phi_n \dots \Phi'_{пт}$ , которые получены из рассмотрения взаимодействия корпуса судна с битым льдом по длине ватерлинии  $L_{вл}$  [3] и различны для переднего и заднего хода.

В качестве примера продемонстрированы расчеты сопротивления по приведенным методикам (1) и (2) для арктического танкера проекта Р-70046 «Михаил Ульянов» дедвейтом 70 тыс. тонн (рис. 1, 2, 3, 4).

Основные характеристики танкера (рис. 1): длина по КВЛ  $L_{квл} = 232,8$  м; ширина судна  $B = 35,00$  м; осадка  $T = 13,90$  м; мощность главных двигателей  $N = 18530$  кВт.

Физико-механические характеристики льда, воды приняты среднестатистические: плотность воды  $\rho = 1,025$  т/м<sup>3</sup>; плотность льда  $\rho_l = 0,9$  т/м<sup>3</sup>; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,33$ ; модуль упругости  $E = 5 \cdot 10^6$  кПа.



РИС. 1. Арктический танкер проекта Р-70046 «Михаил Ульянов»

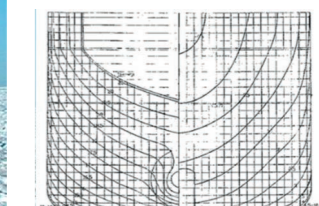


РИС. 2. Кривые чистого ледового сопротивления при движении в битом льду танкера пр. Р-70046 «Михаил Ульянов» (метод Зуева В.А.,  $\bar{s} = 0,6$ )

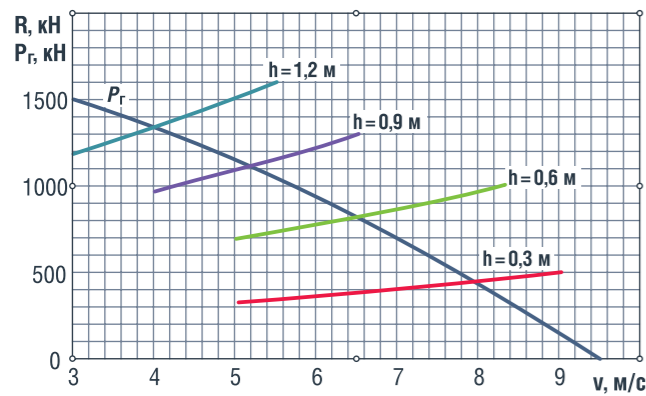
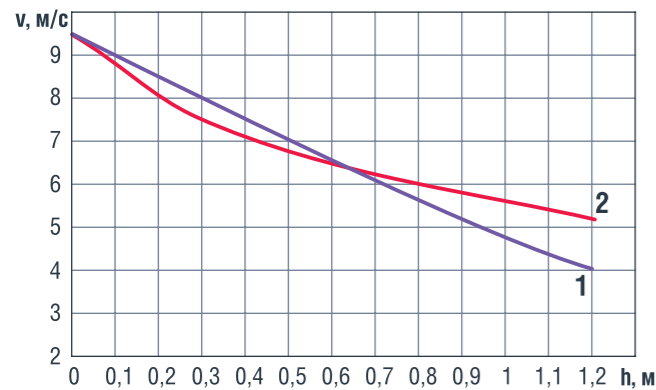


РИС. 4. Кривые ледопроеходимости при движении танкера пр. Р-70046 «Михаил Ульянов» в битом льду: 1 – метод Зуева В.А. ( $\bar{s} = 0,6$ ); 2 – метод Калининой Н.В



Коэффициент трения льда о наружную обшивку  $f = 0,13$  приняты по результатам экспериментальных исследований влияния состояния ледяного покрова на ходкость судов [3] для свежевыпавшего сухого снега.

Тяга ледокола на гаке аппроксимирована выражением [3, 4]:

$$P_{\Gamma} = P_{\text{ш}} \left[ 1 - 0,4 \left( \frac{v}{v_0} \right) - 0,6 \left( \frac{v}{v_0} \right)^2 \right],$$

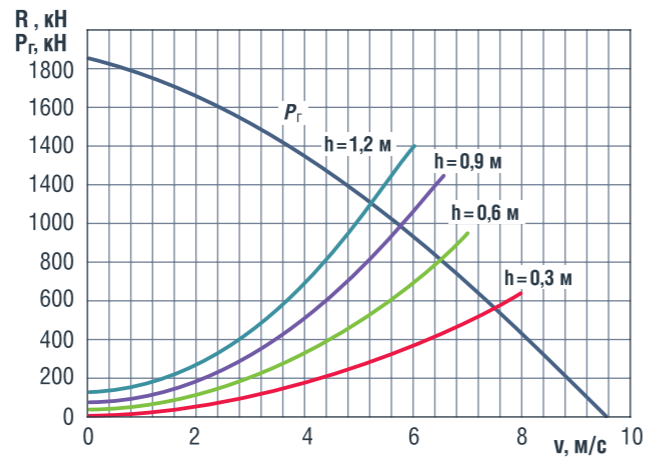
где  $P_{\text{ш}}$  – тяга ледокола на швартовых, кН;  $v$  – скорость ледокола в текущий момент времени, м/с;  $v_0$  – скорость движения на чистой воде при заданной мощности, м/с. Достижимая скорость судна  $v$  определяется из совместного решения уравнений  $P_{\Gamma} = R$ , где  $P_{\Gamma} = P_e - R_b$  – тяга на гаке (называемая по аналогии с буксирами), определяется как разность между полезной тягой движителей  $P_e$  и сопротивлением воды  $R_b$  при данной скорости движения.

На рис. 4 представлены кривые ледопроеходимости танкера при движении в битых льдах, полученные разными методами (1) и (2).

При прогнозировании ледовой ходкости судов используют модельный эксперимент, поскольку проведение натуральных испытаний является сложным и дорогостоящим мероприятием.

Сложность при проведении модельного эксперимента заключается в создании таких условий, при которых полученные результаты можно было бы пересчитать на натурный объект.

РИС. 3. Кривые чистого ледового сопротивления при движении в битом льду танкера пр. Р-70046 «Михаил Ульянов» (метод Калининой Н.В.)



В НГТУ имеется открытый ледовый бассейн для проведения испытаний судов в ледовых условиях. Испытания моделей можно проводить при движении в чистой воде, в битом и сплошном льду. Размеры бассейна следующие: длина 15,6 м; ширина 1,60 м; глубина 0,80 м. Опытный бассейн оборудован гравитационной системой буксировки.

Модель битого льда представляет плитки из полиэтилена высокого давления необходимых толщин и размеров в плане. Эти испытания не требуют искусственного или естественного холода и могут проводиться в любое время года.

Условия подобия при моделировании в битом льду определяются зависимостями [3]:

- $\frac{L_n}{L_m} = \frac{B_n}{B_m} = \dots = \frac{h_n}{h_m} = \lambda$ ;
- числа Фруда  $Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} = idem$ ;
- отношение плотностей  $\rho_n/\rho_b = idem$ ,
- сплоченность  $S = idem$ ,
- коэффициент трения  $f = idem$ ,

где  $L_n, L_m, B_n, B_m, h_n, h_m$  – линейные размеры судна и толщина льда природы и модели.

По данным [3] плотность однолетнего морского льда составляет  $\rho_l = 0,85 - 0,90 \text{ т/м}^3$ , коэффициент трения льда о сталь составляет  $0,08 - 0,12$ .

У полиэтилена высокого давления по данным наших исследований плотность модели льда близка к  $0,9 \text{ т/м}^3$ . Коэффициент трения полиэтилена о корпус окрашенной модели составляет  $0,11 \div 0,13$ . Учитывая нестабильность физико-механических свойств натурального льда, зависящих от температуры, истории и времени намерзания, погодных условий можно считать условия (3) удовлетворительными для моделирования.

Большое разнообразие ледовых условий, нестабильность свойств и характеристик битых льдов делают достаточно сложным точно и определенно зафиксировать многочисленные параметры, характеризующие натурную ледовую обстановку (в том числе толщину, форму и размеры льдин, их сплоченность). Поэтому в эксперименте приближенно моделируется движение судна в некоторой условной среде с осредненными характеристиками.

РИС. 5. Фото модели грузопассажирского судна пр. CNF22 (М 1:50)



РИС. 7. Фрагменты испытаний при движении модели судна пр. CNF22 носом во льду сплоченностью 4 балла и скоростью природы ~12 уз.



РИС. 6. Поле битого льда сплоченностью 4 балла в опытном бассейне



РИС. 8. Фрагменты движения модели судна пр. CNF22 носом во льду сплоченностью 8 баллов и скоростью природы ~12 уз.



Условия подобия соблюдаются лишь в отношении наиболее важных характеристик битого льда (толщин, сплоченности, ширине канала, плотности и коэффициента трения обломков льда о корпус).

Это дает возможность моделировать битый лед с помощью полиэтиленовых плиток одинаковой формы и размеров  $l/h = const$  и обеспечить повторяемость опытов.

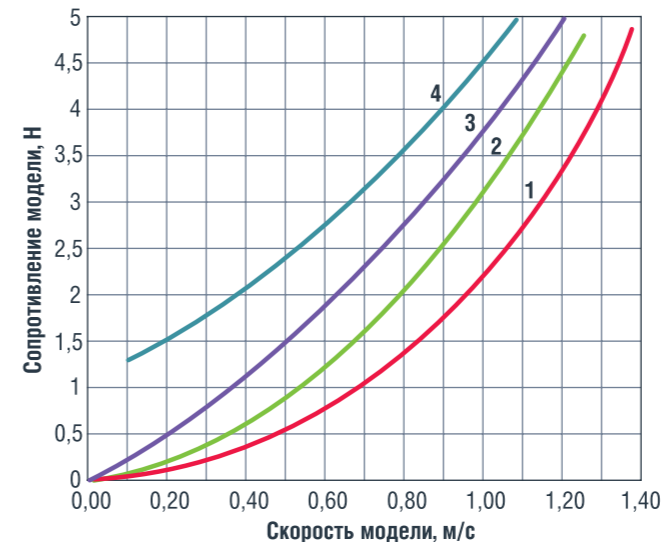
На рис. 5, 6, 7, 8 показаны испытания модели (масштаб 1:50) грузопассажирского судна проекта CNF22 неограниченного района плавания на ледовый класс Ice2 Морского Регистра судоходства с бульбообразной носовой оконечностью, транцевой кормой, с избыточным надводным бортом, с носовым

расположением жилой надстройки, МО в корме, с 2-х винтовой дизельной установкой, кормовым и носовым подруливающими устройствами.

Испытания модели (рис. 5) проводились в битых льдах сплоченностью 4, 6 и 8 баллов в плитках толщиной 10 мм, имеющих форму в плане в виде равнобедренного прямоугольного треугольника с катетом 100 мм. Для природы это составляет толщину льдин – 50 см. Поле битого льда показано на рис. 6, фрагменты испытаний – на рис. 7, 8.

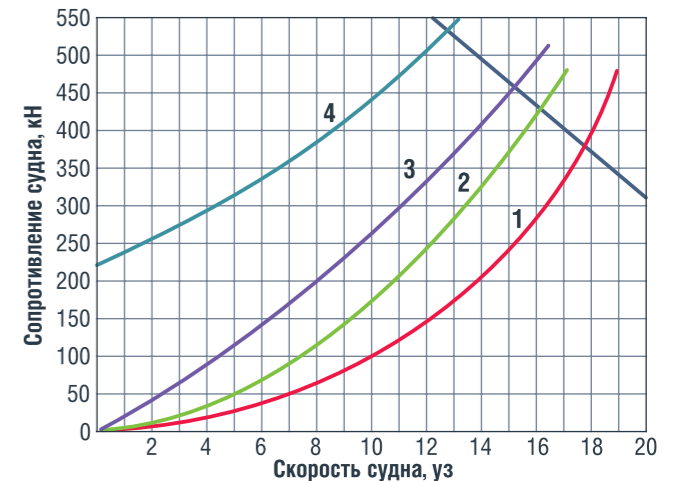
По результатам испытаний получены кривые сопротивления движению модели судна для различных условий движения (рис. 9). Полученные данные были пересчитаны на натурное судно (рис. 10).

РИС. 9. Буксировочные кривые при движении модели судна пр. CNF22 носом



1 – чистая вода; 2 – сплоченность льда 4 балла; 3 – сплоченность льда 6 баллов; 4 – сплоченность льда 8 баллов

РИС. 10. Кривые полного сопротивления при движении судна пр. CNF22 носом

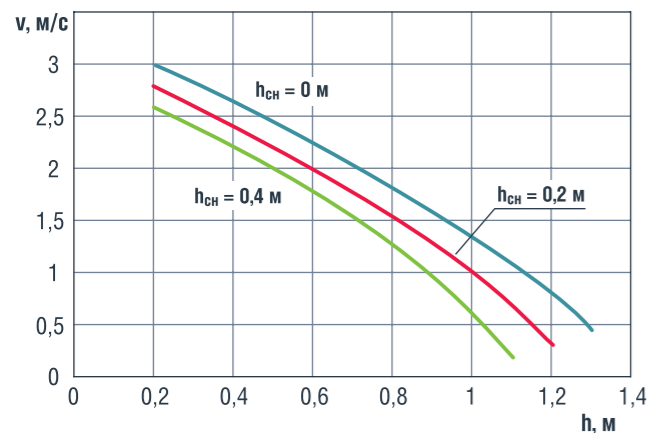


1 – сопротивление воды и воздуха; 2 – сопротивление воды, воздуха и мелкобитого льда толщиной 0,5 м и сплоченностью 4 балла; 3 – сопротивление воды, воздуха и мелкобитого льда толщиной 0,5 м и сплоченностью 6 баллов; 4 – сопротивление воды, воздуха и мелкобитого льда толщиной 0,5 м и сплоченностью 8 баллов; 5 – тяга винтов

РИС. 11. Ледокол проекта 21900 «Москва»



РИС. 13. Кривая ледопроеходимости ледокола пр. 21900 «Москва» при различной заснеженности



В зимний период в транспортировке нефти и газа осуществляется судами арктических ледовых классов, которые способны самостоятельно двигаться в сплошных льдах или под проводкой ледоколов с сложных ледовых условиях. Важно знать не только величину предельной ледопроеходимости, которая является мерой ледовой ходкости, но и прогнозировать сопротивление арктических судов и ледоколов при движении в сплошном льду непрерывным ходом.

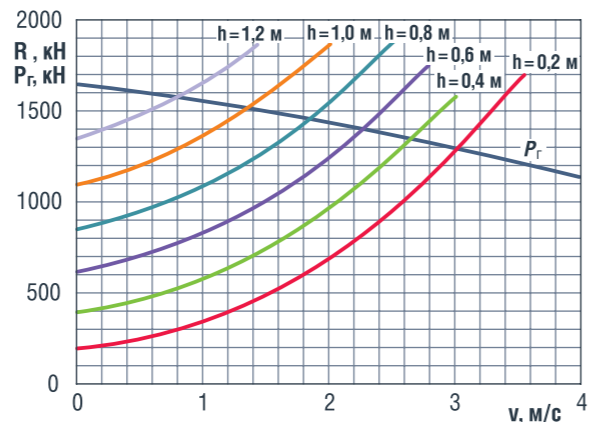
На основе теоретико-экспериментальных исследований с учетом физико-механической картины разрушения ледяного покрова судами Грамузовым Е.М. в НГТУ был разработан полуэмпирический способ расчета чистого ледового сопротивления [3] при движении судов в сплошном льду. Он позволяет в компактной и удобной для использования форме чистое ледовое сопротивление сплошного заснеженного льда представить в виде составляющих [3]:

$$R = R_{pv} + R_{pст} + R_{ov} + R_{ост} + R_{сн}, \quad (3)$$

где  $R_{pv}$  – зависящая от скорости составляющая сопротивления разрушению;  $R_{pст}$  – статическая составляющая сопротивления разрушению;  $R_{ov}$  – зависящая от скорости составляющая сопротивления обломков льда;  $R_{ост}$  – статическая составляющая сопротивления обломков льда;  $R_{сн}$  – сопротивление снега.

Математическая модель чистого ледового сопротивления (3) учитывает главные размерения

РИС. 12. Сопротивление при движении ледокола пр. 21900 «Москва» в ровном бесснежном льду



судов, форму корпуса, физико-механические характеристики льда и снега, так как бесснежный лед редко встречается в реальных условиях [3]. Форма корпуса учтена путем введения в расчетную модель интегральных функций геометрии  $\gamma_{лтф}$ ,  $\gamma_{сф}$ ,  $\Phi_i$  [3], которые получены из пространственного рассмотрения взаимодействия корпуса судна со льдом.

В качестве примера продемонстрированы расчеты ходкости по приведенным методикам для ледокола проекта 21900 «Москва» (рис. 11, 12, 13). Основные характеристики ледокола проекта 21900 «Москва» (рис. 11): длина по КВЛ  $L_{квл} = 104,00$  м; ширина судна  $B = 27,50$  м; осадка  $T = 8,50$  м; мощность главных двигателей  $N = 16400$  кВт.

На рис. 12 продемонстрирован расчет чистого ледового сопротивления ледокола проекта 21900 «Москва» по (3), на рис. 3 построены кривые ледопроеходимости при движении в сплошном ледяном поле как бесснежном ( $h_{сн} = 0$ ), так и заснеженном ( $h_{сн} = 0,2$  м;  $h_{сн} = 0,4$  м).

Модельные испытания в сплошном ледяном поле проводятся в холодное время года с использованием естественной наморозки льда.

Одним из путей проведения испытаний ледоколов во льдах является использования в качестве модели льда естественный лед, намораживаемый в водоеме или в бассейне при отрицательных температурах воздуха.

Естественный лед имеет при моделировании повышенную прочность по сравнению со строгой теорией моделирования, поэтому, очевидно, получило распространение о невозможности его использования. Однако, при использовании естественного льда компенсировать повышенную прочность льда  $\sigma_m$  можно меньшей толщиной, чем требуется (моделируется разрушение ледяного покрова). Многолетний опыт нашей работы в ледовом бассейне НГТУ показал на возможность такого подхода [3].

При испытаниях модели ледокола пр.00902 в сплошном ледяном поле использовался естественный намораживаемый на поверхности воды лед при отрицательных температурах воздуха.

Масштаб пересчета толщин льда при моделировании:

$$\lambda_h = \frac{h_n}{h_m} = \lambda^{4/3}. \quad (9)$$

Модуль пересчета сопротивления при моделировании по Фруду:

$$R_n = \lambda^3 R_m. \quad (10)$$

Скорость движения ледокола:

$$v_n = \sqrt{\lambda} v_m. \quad (11)$$

При пересчете сопротивления разрушения льда возникает масштабный эффект связанный с неучетом при моделировании смятия и дробления крошки в местах контакта. Однако есть основание полагать, что этот эффект невелик.

Равенство коэффициентов трения корпуса судна и модели о естественный и моделируемый лед можно обеспечить специальным покрытием модели.

Чтобы избежать масштабного эффекта связанного с несоответствием толщины льда и составляющей сопротивления обломков необходимо экспериментальное разделение составляющих сопротивления (аналогично разделением сопротивления трения и остаточного при экспериментальном определении сопротивления воды).

Для этого, кроме испытаний в сплошном льду, проводятся испытания в битом льду десятибалльной сплоченности, при толщине, в которой проводились испытания в сплошном льду. Затем определяются кривые сопротивления в ряде толщин льда:

$$R_{1m} = R_m - R_{2m} = f(h, v), \quad (12)$$

$$R_{1m}(v) = R_m(v) - R_{2m}(v), \text{ при } h = const, \quad (13)$$

Пересчет на натуру для составляющих ведется отдельно:

$$R_{1n} = \lambda^3 R_{1m}, v_n = \sqrt{\lambda} v_m, h_n = \lambda^{4/3} \cdot \lambda_E^{-1/3} \cdot h_m. \quad (14)$$

$$R_{2n} = \lambda^3 R_{2m}, v_n = \sqrt{\lambda} v_m, h_n = \lambda h_m. \quad (15)$$

Сопротивление воды  $R_B$  может быть выделено из  $R_m$  и пересчитано традиционными способами, используя испытания модели судна в чистой воде. Однако, как правило, необходимости в этом нет из-за его малости [1], а пересчет полного сопротивления  $R_n$  можно вести по упрощенной методике (10) не разделяя составляющие. Несоответствие толщин

$$\frac{h_n}{h_m} = \lambda$$

приведет к некоторому уменьшению статической составляющей, связанной с притапливанием льдин, которая не велика.

РИС. 14. Установка модели судна пр.00902 перед движением



Пример модельных испытаний судна ледового класса Icebreaker 8 пр.00902 в сплошном льду приведен на рис. 14, 15.

При эксплуатации ледоколов очень часто встречаются тяжелые ледовые условия в которых невозможно двигаться непрерывным ходом. Поэтому ледоколы вынуждены прибегать к работе набегам.

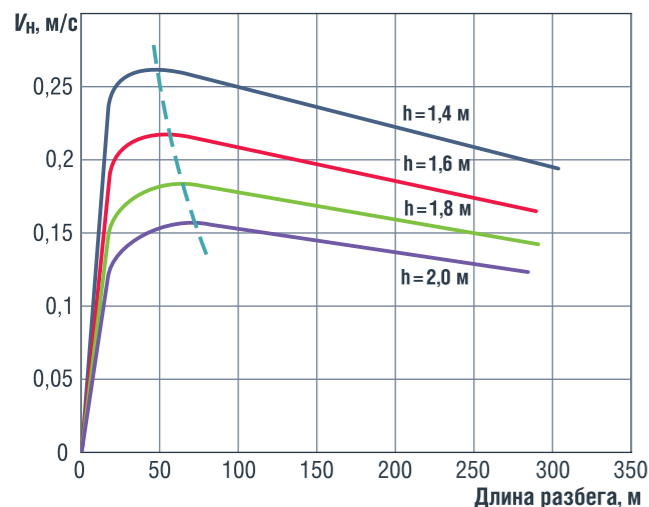
Работа набегам носит циклический характер и складывается из следующих операций. Отход назад в собственном канале осуществляется на расстояние  $l_p$ , необходимое для набора скорости вхождения в сплошной лед очередного цикла продвижения. При этом часть пути ледокол движется под действием тяги заднего хода, определяемой безопасностью работы движительно-рулевого комплекса, и часть пути ледокол движется по инерции при реверсе с заднего хода на передний. На отход требуется время  $t_{от} + t_{зп}$ . Разгон на переднем ходу в собственном канале осуществляется исключительно для набора скорости (кинетической энергии) с положительным ускорением. На пройденный путь при разгоне  $l_p$ , равный полному пути отхода назад, затрачивается время  $t_p$ . После контакта со сплошным ледяным покровом движение ледокола замедляется вплоть до полной остановки. За это время  $t_n$  ледокол продвигается на расстояние  $l_n$ , являющееся полезным путем продвижения. При этом ледокол может двигаться при работе энергетической установки (ЭУ) на полную мощность вплоть до полной остановки, или при продвижении во льду может быть совершен заблаговременный, до остановки судна, реверс ЭУ на задний ход. В первом случае на продвижение ледокола затрачивается время  $t_n$  и после полной остановки осуществляется реверс двигателей с переднего хода на задний, на который затрачивается время  $t_{пз}$ . Время реверса определяется возможностями энергетической установки и считается известным для конкретного судна. Во втором случае путь  $l_n$  во льду складывается из двух слагаемых: пути при движении с работой ЭУ на полную мощность и пути, который судно проходит при реверсировании ЭУ с переднего хода на задний до полной остановки. Время движения в этом случае  $t_n + t_{пз}$ . Если не произошло заклинивание корпуса, начинается движение задним ходом. В противном случае, затрачивается некоторое время на освобождение от заклинивания  $t_{о3}$ . Поэтому средняя скорость движения набегам определяется:

$$v_n = \frac{l_n}{t_{от} + t_{зп} + t_p + t_n + t_{пз} + t_{о3}}. \quad (4)$$

РИС. 15. Движение модели судна пр.00902 в сплошном льду толщиной 4 мм



РИС. 16. Скорость движения набегам от длины разгона ледокола пр. 21900 «Москва»



Определение этой скорости представляет практический интерес для решения задачи оптимизации всего процесса работы ледокола набегам.

Параметры  $l_n$ ,  $t_{от}$ ,  $t_{зп}$ ,  $t_p$ ,  $t_n$ , входящие в (4), определяются из решений дифференциальных уравнений на разных этапах движения [3].

Время реверса ледокола с заднего хода на передний  $t_{зп}$  и с переднего хода на задний  $t_{пз}$ , время освобождения от заклинивания  $t_{оз}$  задаются для конкретного судна.

Определение этой скорости представляет практический интерес для решения задачи оптимизации всего процесса работы ледокола набегам.

Полученные решения должны быть адаптированы к натурным данным по эксплуатации ледоколов в тяжелых льдах. Разработанные математические модели движения могут быть настроены на имеющиеся натурные данные различных ледоколов и получены расчетные модели [1], удовлетворяющие проектировщиков и эксплуатационников.

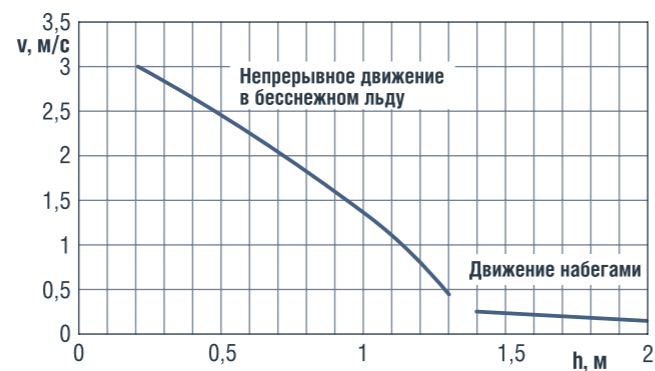
Математическая модель средней скорости движения набегам позволяет анализировать влияние формы корпуса и соотношений главных размерений на эффективность работы.

Полученные математические модели могут быть использованы в проектных организациях на начальных этапах проектирования ледоколов, в научно-исследовательских организациях при проведении собственных исследований, в парходствах при выборе тактики работы ледоколов в тяжелых ледовых условиях.

По существующей методике выполнены расчеты ледовой ходкости при работе набегам для разных проектов судов [6]. В качестве примера на рис. 16 представлена скорость движения набегам от длины разгона, а на рис. 17 – кривые ледопроеходимости ледокола пр. 21900 «Москва».

Выявлено, что при работе ледоколов набегам существует оптимальная тактика движения, которая позволяет достигать максимальной скорости движения и приводит к экономии топлива [2, 5].

РИС. 17. Кривые ледопроеходимости ледокола пр. 21900 «Москва» непрерывным ходом и набегам



Следует отметить, что на данный момент наиболее распространенными методами исследования ледовой ходкости судов являются модельный эксперимент и разработанные расчетные методики. Модельный эксперимент в опытовом ледовом бассейне остается актуальным, поскольку проведение натурных экспериментов дорого и требует большого количества времени. Увеличение количества и повышение качества данных натурных экспериментов приводит к повышению надежности методик расчета ледовой ходкости судов. Приведенные теоретико-экспериментальные модели следует рассматривать в единстве с используемыми натурными данными.

Представленные результаты исследований позволяют прогнозировать ходкость ледоколов и судов ледового плавания на этапе проектирования.

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

#### Литература

- Грамузов Е.М. Использование данных натурных экспериментов для построения полумпирической модели движения ледокола набегам / Е.М. Грамузов, В.А. Зувев, Н.В. Калинина, А.А. Куркин / Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2021. № 4. С. 83–90.
- Ионов Б.П. Выбор тактики движения судов в тяжелых льдах / Б.П. Ионов, Н.В. Калинина / Морской вестник. 2013. № 1 (45). С. 106–108.
- Ионов Б.П. Ледовая ходкость судов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. СПб.: Судостроение, 2013.
- Ионов Б.П. Проектирование ледоколов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов, В.А. Зувев; СПб.: Судостроение, 2013.
- Калинина Н.В. Использование математических моделей движения судов в тяжелых льдах при выборе тактики маневрирования / Н.В. Калинина / Всероссийская научно-техническая конференция «Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве», 17–20 ноября 2009 г., Н. Новгород, 2009. С. 207–215.
- Калинина Н.В. Прогнозирование ходкости ледокола проекта 21900 типа Москва в различных путевых условиях / Н.В. Калинина / Транспортные системы, №2(12), 2019. Н. Новгород, НГТУ. С.38-50.
- Колпаков А. Нефтяной полярный горизонт [Электронный ресурс]. – Эксперт Северо-Запад № 40–41 (739) 3 октября 2016 – 16 октября 2016. – Режим доступа: <https://expert.ru/northwest/2016/40/neftyanoy-polyarnyy-gorizont/>. Дата обращения 5.10.2022. – Загл. с экрана.
- The ARCTIC. Природные ресурсы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.arctic.ru/resources/print/>. Дата обращения 5.10.2022. – Загл. с экрана.

KEYWORDS: oil and gas transportation, Northern sea route, ice conditions, icebreakers, arctic ships, research and forecast of ships ice propulsion, mathematical models of ice resistance and speed, experimental studies.