

УДК629.5.01

ESTIMATION OF ICE-GOING CAPABILITY OF PILOT BOATS AT THE INITIAL STAGE OF DESIGN**ОЦЕНКА ЛЕДОПРОХОДИМОСТИ ЛОЦМАНСКОГО КАТЕРА НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

R.S. Kvitkovskij¹, *deputy chief designer of project, naval architect engineer,*
A.V. Bondarenko², *Ph.D., associate professor*

Р.С. Квитковский¹, *зам. главного конструктора проекта, инженер-кораблестроитель,* **А.В. Бондаренко²**, *к.т.н., доцент*

¹ PJSC «Chernomorsudoprojekt», Ukraine

¹ ПАО «Черноморсудопроект», Украина

² National University of Shipbuilding, Ukraine

² Национальный университет кораблестроения, Украина

ABSTRACT

The question of estimation of pilot boat ice-going capability at the initial stage of design has been considered in the article. The analysis of the accuracy of calculations based on various empirical formulas is made. The methodology of estimation of the ice-going capability of the pilot boat at the initial stage of design is suggested. The basis of the methodology is the approach which presents the recalculation of the geometric and weight characteristics of the project vessel based on the close prototype vessel. The problem of selecting an appropriate engine for the pilot boat is considered.

Keywords: pilot boat, ice-going capability, design.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

Лед в Черноморско-Азовском бассейне Украины наблюдается в отдельных районах. В устьях рек Днепр, Южный Буг и Днестр появление устойчивого льда отмечается обычно в середине декабря. Открытые районы северо-западной части Черного моря замерзают не каждый год. Наиболее тяжелым в ледовом отношении является период с конца января до начала марта, обычно февраль. В конце марта море полностью освобождается ото льда[1]. Поэтому строительство лоцманских катеров с ледовым классом является нецелесообразным ввиду увеличения их стоимости. Более рациональным путем является проектирование лоцманских катеров (ЛК) без ледовой категории с предварительной оценкой их ледопроходимости при возможном эпизодическом движении во льдах. При этом под ледопроходимостью понимают предельную толщину сплошного ровного льда, которую может преодолеть судно, двигаясь с минимальной устойчивой скоростью (приблизительно 1,5–3 узла) при работе главных двигателей на полную мощность. Для портов Украины наличие

ледопроходимости у ЛК является желаемым качеством. Но включение этого требования в перечень технического задания вызывает значительные трудности у проектировщика с точки зрения расчета.

Наиболее достоверным методом оценки ледопроходимости судна является проведение модельных испытаний в опытовом бассейне. Но, как свидетельствует практика, это связано с определенными трудностями среди которых, в первую очередь, следует назвать высокую стоимость таких испытаний и малое количество лабораторий, которые могут выполнить такие исследования. Поэтому задача оценки ледопроходимости лоцманского катера на начальном этапе проектирования без проведения модельных испытаний является актуальной.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Проведенный авторами обзор литературы показал, что методики расчета ледопроходимости судна на начальных стадиях проектирования рассмотрены, чаще всего, применительно к ледоколам или судам ледового плавания [2–4]. В тоже время, остается неизученным вопрос возможности применения этих методик к оценке ледопроходимости лоцманских катеров. Для решения вопросов ледовой ходкости в настоящее время начинают применяться САЕ-системы, реализующие численные методы [5, 6]. Но использование численных методов связано со значительными затратами времени на получения результатов, что для начальных этапов является неприемлемым. Кроме того, научных публикаций, посвященных непосредственно оценке ледопроходимости ЛК, на данный момент нет.

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

Целью данной статьи является разработка методики оценки ледопроходимости лоцманского катера на начальной стадии проектирования.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

1. Оценка ледопроходимости катеров «Скорый» и «ЛК 1500» по эмпирическим формулам для ледоколов

Изначально предполагалось, что наиболее целесообразным подходом к оценке ледопроходимости лоцманского катера является использование статистических зависимостей, предлагаемых различными авторами применительно к ледоколам. Проведенный для лоцманского катера «Скорый» (табл. 1) расчет дал следующие результаты.

Формула Афанасьева В.И. [2]:

$$N = c \cdot v \cdot t^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где N – мощность двигателей в л.с.; v – скорость движения в узлах; t – толщина льда в см; α – угол наклона форштевня в градусах, $\operatorname{tg} 42^\circ = 0,9004$; c –

коэффициент, зависящий от физико-механических свойств льда (рекомендуется принимать равным 5 для пресного и 3 – для морского льда).

Преобразуя формулу относительно t , получаем:

$$t = \sqrt{\frac{N}{c \cdot v \cdot \operatorname{tg} \alpha}} = \sqrt{\frac{1207}{3 \cdot 1 \cdot 0,9004}} = 21,14 \text{ см.}$$

Характеристики лоцманских катеров

Характеристика	«ЛК 1500»	«Скорый»
Длина наибольшая, м	15,5	19,7
Длина по корпусу, м	15,0	18,0
Длина по ватерлинии, м	13,58	17,6
Ширина габаритная, м	4,80	5,60
Ширина по корпусу, м	4,40	5,33
Ширина по ватерлинии, м	4,05	4,79
Осадка габаритная, м	1,60	1,85
Водоизмещение полное, т	25,5	35,87
Момент, дифферентующий на 1 см, тм/см	0,39	0,75
Продольная метацентрическая высота, м	21,00	35,98
Мощность ГД, кВт	533	888
Тяга на швартовах, т	8,20	13,66
Угол наклона касательной к форштевню в районе ватерлинии, град.	40	42

Формула Рунеберга Р.И., полученная на основе данных опыта работы ледоколов в ледовых условиях Балтийского моря [2]:

$$h = c \cdot P^{0,5} \cdot B^{-0,25},$$

где h – толщина льда в дюймах; P – мощность двигателей, л.с.; B – ширина судна, м; c – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств льда (принят равным 0,15).

После подстановки значений

$$t = 0,15 \cdot 1207^{0,5} \cdot 4,79^{-0,25} = 3,52 \text{ дюйма} = 8,94 \text{ см.}$$

Формула, приведенная в работе [3]:

$$h_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{T_{\text{шв}} \cdot \Delta^{0,25}}{c_{\text{лед}}}},$$

где h – предельная толщина льда в см; $T_{\text{шв}}$ – тяга винтов в швартовом режиме в кгс; Δ – водоизмещение в тоннах; $c_{\text{лед}}$ – коэффициент, равный 108 для всех ледоколов.

$$h_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{13660 \cdot 35,87^{0,25}}{108}} = 17,59 \text{ см.}$$

Формула по данным работы [3]:

$$h_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{N_{\text{в}} \cdot \Delta^{0,25} \cdot \eta_{\text{пр}}}{c'_{\text{лед}}}}, \quad (1)$$

где $h_{\text{пр}}$ – предельная толщина льда в см; $N_{\text{в}}$ – мощность на валах в л.с.; Δ – водоизмещение в тоннах; $\eta_{\text{пр}}$ – коэффициент по ледоколу «Василий Прончищев», равный 0,060; $c'_{\text{лед}}$ – коэффициент равный 0,7.

$$h_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{1207 \cdot 35,87^{0,25} \cdot 0,060}{0,7}} = 15,91 \text{ см.}$$

Формула из работы [4]:

$$h_{\text{л}} = 0,264 \left(\frac{P_{\text{е}}}{B} \right)^{0,75},$$

где $h_{\text{л}}$ – толщина льда в м; $P_{\text{е}}$ – тяга винтов в тоннах; B – ширина в м.

$$h_{\text{л}} = 0,264 \left(\frac{13,66}{4,79} \right)^{0,75} = 0,579 \text{ м} = 57,9 \text{ см.}$$

Исходная формула [4]:

$$P_{\text{е}} = k_2 \cdot B \cdot h_{\text{л}}^{4/3},$$

где $P_{\text{е}}$ – тяга винтов в тоннах; k_2 – коэффициент, равный 5,45; B – ширина в м; $h_{\text{л}}$ – толщина льда в м.

Преобразуя формулу относительно $h_{\text{л}}$, получаем:

$$h_{\text{л}} = \left(\frac{P_{\text{е}}}{k_2 \cdot B} \right)^{3/4} = \left(\frac{13,66}{5,45 \cdot 4,79} \right)^{0,75} = 0,615 \text{ м} = 61,5 \text{ см.}$$

Формула [4]:

$$N_{\text{в}} = k_1 \frac{L \cdot B^2}{V^{2/3}} h_{\text{л}}^2,$$

где $N_{\text{в}}$ – мощность на валах в кВт; k_1 – коэффициент, равный 69 кВт/м³; L , B – длина, ширина в м; V – объемное водоизмещение в м³; $h_{\text{л}}$ – толщина льда в метрах.

Преобразуя формулу относительно $h_{\text{л}}$, получаем:

$$h_{\text{л}} = \sqrt{\frac{N_{\text{в}} \cdot V^{2/3}}{k_1 \cdot L \cdot B^2}} = \sqrt{\frac{888 \cdot 35,87^{0,6667}}{69 \cdot 17,6 \cdot 4,79^2}} = 0,589 = 58,9 \text{ см.}$$

Как видно из расчетов, даже для ледоколов определение предельной толщины льда по существующим эмпирическим формулам, порой отличаются от натурных данных на 20%. Объяснением этому может быть то, что сами

формулы разработаны для узкого применения, и, естественно, не охватывали всего многообразия факторов, присутствующих при процессе разрушения ледяного поля.

И тем не менее, представляет интерес выполнение анализа ледопроходимости по зависимости (1) [3] с привлечением данных по 2-х винтовому речному буксиру-ледоколу проекта 941, мощностью 600 л.с., водоизмещением 192 т, преодолевающего лед толщиной 10 см [7].

Для оценки ледопроходимости «ЛК 1500» используется построенный график ледопроходимости со спецификационной точкой «Скорый» (рис. 1) и точкой, полученной в результате натурных испытаний речного буксира-ледокола проекта 941 в функции от произведения мощности и водоизмещения в степени 0,5 и 0,125 соответственно.

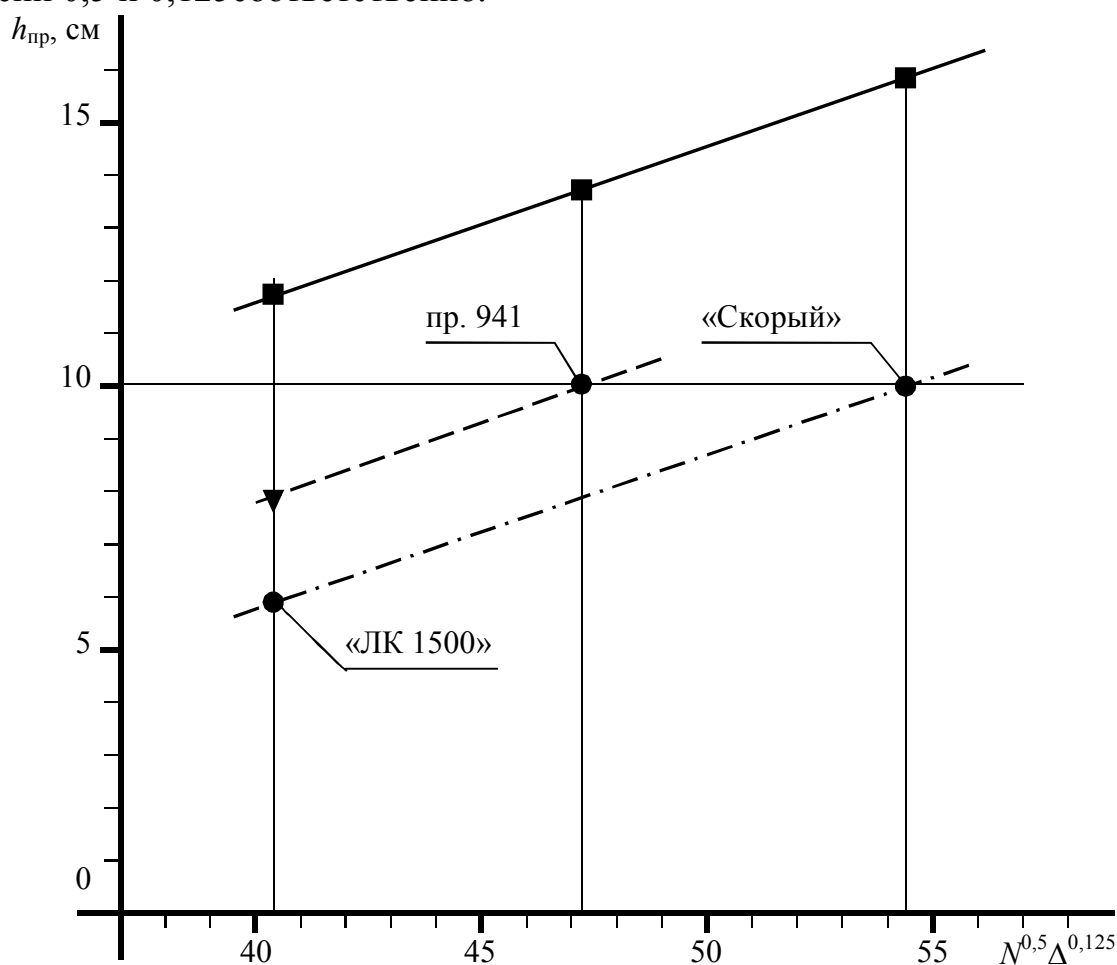


Рис. 1. График ледопроходимости:

— — ледокольная форма корпуса (морской лед); --- — ледокольная форма корпуса (пресный лед); - · - · - — катерная форма корпуса (пресный лед).

Верхняя прямая линия построена по зависимости [3]:

$$h_{пр} = \sqrt{\frac{N_{\epsilon} \Delta^{0,25} \eta_{пр}}{c_{лед}}},$$

где $h_{пр}$ – предельная толщина льда в см, N_g – мощность на валах в л.с., Δ – водоизмещение в тоннах, $\eta_{пр}$ – коэффициент, равный 0,06, $c_{лед}$ – коэффициент, равный 0,7

$$\text{Точка для «Скорого» } h_{пр} = \sqrt{\frac{1207 \cdot 35,87^{0,25} \cdot 0,06}{0,7}} = 15,91 \approx 15,9 \text{ см.}$$

$$\text{Точка для пр.941 } h_{пр} = \sqrt{\frac{600 \cdot 192^{0,25} \cdot 0,06}{0,7}} = 13,84 \approx 13,8 \text{ см.}$$

$$\text{Точка для «ЛК 1500» } h_{пр} = \sqrt{\frac{725 \cdot 25,5^{0,25} \cdot 0,06}{0,7}} = 11,82 \approx 11,8 \text{ см.}$$

Надо полагать, что это не что иное, как отображение ледопроходимости ледокольной формы корпуса в морском льду. Далее наносится точка ледопроходимости речного рейдового буксира-ледокола и через нее проводится параллельная линия верхней линии до пересечения с вертикальной линией «ЛК 1500». Точка пересечения вертикальной линии «ЛК 1500» выше проведенной параллельной верхней линии дает точку ледопроходимости для ледокольной формы корпуса для пресного льда.

Используя зависимость Афанасьева В.И. $N = cvt^2 \operatorname{tg} \varphi$ в части поправки на переход от ледокольной формы к катерной, получаем:

$$k = \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\theta_{л})}{\operatorname{tg}(\theta_{к})}} = \sqrt{\frac{0,4663}{0,8300}} = 0,7455$$

где $\theta_{л}$ – угол наклона форштевня, равный 25° для большинства ледоколов; $\theta_{к}$ – угол наклона форштевня лоцманского катера, равный 40° .

На значение k и уменьшается полученная ордината:

$$7,9 \cdot 0,7455 = 5,88 \approx 6,0$$

т.е. ледопроходимость «ЛК 1500» определяется равной 6 см.

С целью проверки «закона» верхней линии, соединяем полученную точку ледопроходимости «ЛК 1500» с точкой ледопроходимости катера «Скорый». Как видно, линия на графике, соединяющая «ЛК 1500» и «Скорый», параллельна верхней линии. Это обстоятельство может свидетельствовать о том, что механизм разрушения ледяного сплошного поля пресноводного льда катерами сходен с механизмом разрушения льда ледоколом.

Как видно из вышеприведенных расчетов, применение эмпирических ледокольных формул для оценки ледопроходимости катера «ЛК 1500» не может дать достоверных результатов в связи с большим разбросом результатов при расчете по разным формулам.

В связи с этим, по нашему мнению, более достоверную оценку ледопроходимости можно получить путем сравнения геометрических и весовых характеристик катера «ЛК1500» и катера «Скорый».

2. Оценка ледопроходимости катера проекта «ЛК 1500» путем пересчета с прототипа

В основу предлагаемой методики оценки ледопроходимости лоцманского катера положена идея пересчета с близкого прототипа, для которого известна его ледопроходимость.

Суть методики рассмотрим на примере оценки ледопроходимости лоцманского катера проекта «ЛК 1500». В качестве близкого прототипа выбран лоцманский катер «Скорый». Основные характеристики сравниваемых судов представлены в табл. 1.

2.1. Основные предпосылки

Прочностные характеристики льда зависят от множества факторов. Прежде всего от температуры самого льда, солёности, примесей, методов определения прочностных характеристик и др. Морской лед менее прочный, чем пресноводный. В расчетах принимаются осредненные, наиболее вероятные значения. Так, соотношение прочности морского льда к пресноводному принимается как 3 к 5. В абсолютных величинах прочность на изгиб, которая играет наиболее важную роль в разрушении льда, составляет для морского льда 8 кг/см², пресноводного 12,5 кг/см²[2], [8].

По результатам модельных испытаний установлено, что ориентировочное значение разрушающего (проламывающего) усилия описывается параболической зависимостью[9]:

$$P=20 h^2,$$

где P – разрушающее усилие в кг, h – толщина льда в см.

Движение катера в сплошном ледовом поле можно сравнить с ледоколом, вероятно, с оговоркой, так как характер обводов корпуса ледокола и катера существенно отличаются. Хотя аналогия и далекая, сравнение все же возможно, поскольку в основу механизма ломки предельного льда положен один принцип: наплывание носовой части корпуса на лед и проламывание его под действием возникающего при этом вертикального усилия.

Движение ледокола в сплошном ледяном поле предельной толщины с минимальной скоростью 1–2 узла неравномерное в связи с дискретным случайным характером ломки льда. Цикл начинается с момента удара носовой оконечности в кромку льда и наплывания корпуса судна (форштевня, затем бортов) на кромку льда, расходуя кинетическую энергию хода. При этом судно дифференцируется на корму (идет накопление потенциальной энергии), соответственно нарастает усилие на кромку льда до разрушающего значения. Как правило, разрушение льда начинается с возникновения продольной трещины вперед по линии форштевня. При дальнейшем наплывании судна на лед от форштевня развиваются кольцевые изгибные трещины, приводящие к обламыванию льда в виде отдельных секторов с распространением их в стороны бортов, которые затем поворачиваются, притапливаются и расталкиваются в образовавшейся полосе чистой воды в стороны кромок канала. Образовавшийся канал несколько больше ширины судна и льдины, если нет специальных носовых обводов корпуса, не всегда проталкиваются под кромку канала, и как бы все время «норовят» заклинить судно. Если ситуации заклинки не возникает, сопротивление судна в этот период уменьшается, а

скорость судна увеличивается до соприкосновения с очередной кромкой льда и, таким образом, цикл повторяется.

2.2. Описание методики

Как известно, при изменении дифферента, возникающего от напоздания носовой оконечности судна на лед в зоне контакта, появляется вертикальное усилие R_z , которое при достижении критического значения проламывает лед.

Величину R_z можно определить из соотношения

$$R_z L / 2 = M ,$$

где M – дифферентующий момент; L – длина судна, м.

Определив M через момент, дифферентующий судно на один сантиметр, получим следующую зависимость

$$R_z L / 2 = MCT \cdot \delta d ,$$

где δd – дифферент судна, м.

Откуда

$$R_z = \frac{MCT \cdot \delta d}{L / 2} .$$

Ввиду вышесказанного можно считать, что величина усилия R_z пропорциональна моменту, дифферентующему судно на один сантиметр MCT . Для катера «Скорый» дифферентующий момент равен 0,75 тм/см, для «ЛК 1500» – около 0,39 тм/см. Таким образом, возникающее в зоне контакта вертикальное усилие для «ЛК1500» будет меньше такого же усилия для «Скорого» пропорционально отношению их дифферентующих моментов, т.е. примерно в 2 раза ($0,75/0,39=1,92$). Соответственно будет меньше и толщина проламываемого льда, которая составит около 7 см (т.к. проламывающая сила

льда пропорциональна квадрату толщины льда, $h = 10 \left(\frac{0,39}{0,75} \right)^{0,5} = 7,2$ см.)

2.3. О работе главных двигателей в ледовой обстановке

Наибольшее сопротивление и малая скорость 1–2 узла при преодолении предельной толщины льда судном требует выдачи полной мощности главным двигателем, работающим в режиме близком к швартовному.

На рис. 2 в относительных координатах приведены зависимости «обороты – мощность» кривых винта свободного хода и швартовного режима, а также ограничительные кривые 4-х типов двигателей: VOLVOPENTA D12-715, CAT C18, MTU, Scania DI 16 43M.

Как видно из приведенных кривых, только двигатель фирм VOLVOPENTA обеспечивает выдачу 100 % мощности при 80 % оборотах в швартовном режиме. Двигатель CAT C18 – около 90% мощности при около 79 % оборотах. Двигатель MTU – около 61 % мощности при около 70 % оборотах. Двигатель Scania обеспечивает выдачу около 82 % мощности при около 76 % оборотах.

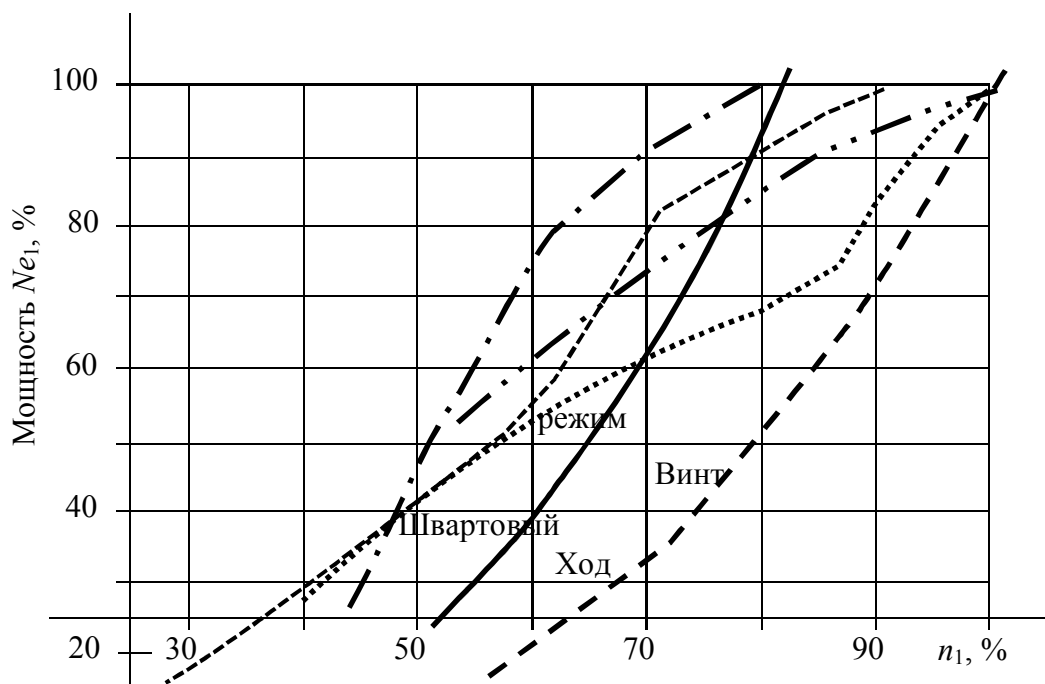


Рис. 2. Зависимость мощности от числа оборотов:

..... – Volvo Penta D12–715; – · – Scania DI 16 43M; – – – – CATC18; – – – – – MTU; Ne_1 – отношение мощности двигателя при соответствующем числе оборотов n_i к максимальной длительной мощности, %; n_1 – отношение числа оборотов n_i к максимальному числу оборотов двигателя, %.

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

Использование эмпирических ледокольных формул для оценки ледопроходимости лоцманского катера «Скорый» дало результаты, показывающие превышение заявленной ледопроходимости в 10 см от 0,9 до 6 раз.

Предложенная методика оценки ледопроходимости лоцманских катеров на начальных этапах проектирования дает приемлемую точность расчетов при минимальном количестве исходных данных. Проведенная экспертная оценка по данной методике позволяет сделать вывод, что при существующих геометрических и весовых характеристиках проекта катера «ЛК1500» толщина льда, который он сможет проломить, будет примерно в 1,7...1,4 раза меньше, чем для катера «Скорый» и может составить около 6...7 см.

Анализ спецификационных характеристик судовых двигателей позволяет сделать вывод, что для обеспечения ледопроходимости лоцманских катеров наиболее предпочтительными являются двигатели фирм VOLVOPENTA и CATERPILLAR.

Перспективой дальнейшей работы по данному направлению является применение систем численного анализа (CAE систем) для оценки ледопроходимости лоцманских катеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морское и речное судоходство Украины: Справочник [Текст]/Под общей редакцией В. Денисова. – Одесса: Судоходство, 1996. – 176 с.

2. Каштелян В.И. Сопротивление льда движению судна [Текст] / В.И. Каштелян, И.И. Позняк, А.Я. Рывлин. – Л.: Судостроение, 1968. – 268 с.
3. Рывлин А.Я. Испытания судов во льдах [Текст] /А.Я. Рывлин, Д.Е. Хейсин. – Л.: Судостроение, 1980. – 208 с.
4. Ледовые качества судов // Труды ААНИИ, 1981. – Том 376. – С.44.
5. Лобанов В.А. Ледовая ходкость танкера река-море плавания с нетрадиционными носовыми обводами [Электронный ресурс] / В.А. Лобанов //Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – №1. – Режим доступа: naukovedenie.ru/pdf/55tvn113.pdf.
6. Лобанов В.А. Оценка ледовой ходкости судна численными методами [Электронный ресурс] /В.А. Лобанов // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2011. –№1. – Режим доступа: <http://www.math.spbu.ru/diffjournal/pdf/lobanov5.pdf>.
7. Справочник по серийным транспортным судам. Том 5.– М.: Транспорт, 1967. –184 с.
8. Строение и физико-механические свойства льда [Текст] // Труды ААНИИ, 1976. – Том 331. – С. 29.
9. Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника [Текст] /И.С. Песчанский. – Л.: Морской транспорт, 1963. – 348 с.