

УДК 629.124

Е.М. Грамузов, Н.Е. Тихонова

**ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЧНЫХ ЛЕДОКОЛОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе рассмотрен подход к проектированию речного ледокола путём оптимизации его проектных характеристик. Предложены обобщённые критерии оптимизации. Рассмотрены составляющие математической модели судна и расчётные блоки, включённые в программный комплекс, позволяющий автоматизировать процесс выбора проектных характеристик ледокола.

*Ключевые слова:* речной ледокол, проектные характеристики, проектирование, математическая модель, оптимизация

Определение основных элементов и особенно формы корпуса при проектировании ледокола всегда тесно связывалось с обеспечением ледовой ходкости. В последние годы теория и методы расчёта ледового сопротивления движению ледокола получили существенное развитие. В частности, для речных ледоколов разработаны расчётные методы [1, 2, 3], позволяющие детально учитывать пространственное взаимодействие корпуса ледокола со льдом при определении ледового сопротивления. Указанные расчётные методы в явном виде включают главные размерения и характеристики формы носовой оконечности ледокола, толщину и физико-механические характеристики льда, скорость движения ледокола. Это послужило стимулом к разработке методов оптимизации основных проектных характеристик ледокола с учётом формы носовой оконечности на ранних стадиях проектирования.

Мощность главной энергетической установки, если она напрямую не определена техническим заданием на проектирование, определяется, как известно, обеспечением заданной ледоходности судна, а именно, скоростью хода в заданных ледовых условиях. В качестве ледовых условий чаще всего задаётся толщина преодолеваемого сплошного ледяного покрова. Если в техническом задании определена мощность главной энергетической установки, то при проектировании стремятся получить максимальную достижимую скорость в конкретных ледовых условиях или максимальную предельную толщину сплошного ледяного покрова, преодолеваемого непрерывным ходом. И в том, и в другом случае актуальной задачей является определение оптимальных главных размерений и формы корпуса ледокола.

Особо следует остановиться на определении целевой функции или выборе критерия оптимизации, учитывая, что ледокол проектируется в основном для выполнения ледокольной работы, которая измеряется длиной ледового канала или пройденного пути в конкретных ледовых условиях. Минимизации подлежат затраты на выполнение ледокольной работы. В [4] в качестве критериев оптимизации различных ледокольных средств предложены удельные приведённые затраты и удельный расход топлива на разрушение единицы объёма льда. Мы рассматриваем линейный ледокол, ширина корпуса которого определяется требуемой шириной прокладываемого канала. При оптимизации линейных ледоколов в рамках одного технического задания в качестве критериев оптимизации можно использовать удельные приведённые затраты  $K_1$ , измеряемые в денежных единицах на единицу длины и удельный расход топлива на ледокольную работу, измеряемый в единицах массы на единицу длины:

$$K_1 = \Pi/V; \quad K_2 = (Nq_T)/V,$$

где  $\Pi$ ,  $V$ ,  $N$ ,  $q_T$  – приведённые затраты, скорость хода, суммарная мощность главных двигателей, удельный расход топлива главными двигателями соответственно.

По этим критериям можно сравнивать проекты ледоколов, предназначенных для

работы в некоторых конкретных ледовых условиях. Однако на практике ледоколы эксплуатируются в ледовых условиях, имеющих значительную изменчивость и разнообразие форм. Даже в ледовых условиях одного вида, например, ровный сплошной ледяной покров, баланс составляющих ледового сопротивления существенно зависит от толщины ледяного покрова [5]. В свою очередь разные составляющие ледового сопротивления по-разному реагируют на изменение формы носовой оконечности ледокола. Из этого следует, что ледоколы, спроектированные для движения в более или менее толстом ледяном поле, должны иметь различную форму носовой оконечности. Тем более изложенное справедливо для различных по форме ледообразований, таких как битые льды различных видов, толщины и сплочённости, сплошные льды различной толщины, включая лёд с толщиной выше предельной и т.д.

При проектировании ледокола как универсального средства борьбы с ледовыми затруднениями и выполнения ледокольных работ, на наш взгляд, необходимо учитывать разнообразие ледовых условий эксплуатации. Аналогичный подход представлен и в работе [6]. Очевидно, что эффективность проектных решений зависит от продолжительности работы ледокола в различных ледовых условиях. Структура ледовых условий зависит от района плавания ледокола и может быть задана двумя способами.

В первом случае может быть задано распределение ледовых условий по длине ледовых трасс. В результате обобщения и систематизации материалов многолетних наблюдений за гидрологическим режимом рек и водохранилищ определяются относительные протяжённости участков трасс  $\bar{l}_i$  ( $\sum \bar{l}_i = 1$ ) с различными ледовыми условиями  $L_i$ . Тогда обобщённые критерии оптимизации можно представить в виде:

$$K_1 = \sum (P_i/V_i)\bar{l}_i = \sum K_{1i}\bar{l}_i; \quad K_2 = q_T \sum (N_i/V_i)\bar{l}_i = \sum K_{2i}\bar{l}_i.$$

Во втором случае может быть задано распределение относительного времени плавания  $\bar{t}_i$  ( $\sum \bar{t}_i = 1$ ) в различных конкретных ледовых условиях. Такой способ описания ледовых условий целесообразен для универсальных ледоколов, не имеющих постоянных маршрутов движения. Получить такую количественную информацию путём обработки материалов научных экспедиций и судовых наблюдений технически сложно. Однако её приближённо может заменить соответствующая обработка экспертных оценок судоводителей. В этом случае обобщённые критерии оптимизации можно рассчитать по формулам:

$$K_1 = \sum P_i\bar{t}_i / \sum V_i\bar{t}_i; \quad K_2 = q_T \sum N_i\bar{t}_i / \sum V_i\bar{t}_i.$$

Значения скоростей  $V_i$ , фигурирующие в формулах, рассчитываются для конкретных условий  $L_i$ . В большинстве случаев ледокол работает с использованием полной мощности главных двигателей  $N_i = N$ . Однако для лёгких ледовых условий и в некоторых других случаях возможно частичное использование мощности.

Следует отметить, что недостаточно точное задание распределения ледовых условий должно оказывать влияние на значения оптимизируемых параметров и целевой функции. Однако это не может быть основанием для отказа от учёта разнообразия ледовых условий, поскольку при проектировании формы корпуса на единственные ледовые условия получаемый результат будет ещё дальше от цели, чем при неточностях в распределении. Иллюстрацию этого факта можно найти в работе [6], а также в приведённых далее данных.

Математическая модель ледокола, позволяющая оптимизировать основные проектные характеристики на ранних стадиях проектирования, включает аналитические уравнения проектирования, ограничения, генерирование теоретического чертежа, алгоритмы расчёта ледовой ходкости, алгоритмы проверочных общесудовых расчётов.

Проектирование ледокола имеет ряд характерных особенностей, отличающих его от проектирования других водоизмещающих судов гражданского назначения. В основном эти отличия связаны со спецификой ледовой ходкости и проектированием теоретического чертежа. Отработка обводов ледокола до настоящего времени в основном велась с помощью

дорогостоящих модельных исследований в ледовых опытовых бассейнах. Описанные ранее исследования в области ходкости позволили обратиться к оптимизационному проектированию обводов ледокола. Учитывая взаимосвязь формы корпуса и основных проектных характеристик, разработана математическая модель проектирования ледокола.

Математическая модель включает:

$\bar{C}(c_1, c_2, \dots, c_n)$  – вектор параметров технического задания на проектирование ледокола (класс судна, район плавания, автономность, число членов экипажа, требования к ледовой ходкости и т.д.);

$\bar{X}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор искомых характеристик (главные размерения, водоизмещение, мощность энергетической установки, форма корпуса ледокола, характеризуемая коэффициентами формы);

генерирование теоретического чертежа;

систему ограничений, включающую аналитические уравнения проектирования ледокола  $G_j(\bar{X}, \bar{C}) \geq A_j, j=1, \dots, m$ , (уравнение масс, уравнение плавучести, уравнение остойчивости, уравнение вместимости, уравнение ходкости);

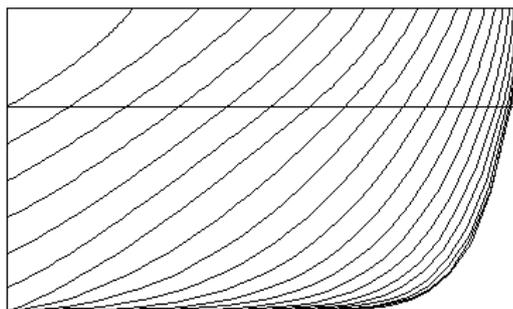
ограничения на компоненты вектора искомых характеристик  $x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}$  (осадка, ширина корпуса, и т.д.);

целевую функцию  $Z(\bar{X}, \bar{C})$ .

В качестве управляемых оптимизируемых переменных используются основные проектные характеристики ледокола: водоизмещение, главные размерения, мощность главных двигателей, число и геометрические характеристики гребных винтов, параметры, характеризующие ледокольную форму носовой оконечности.

В состав системы аналитических уравнений проектирования включены уравнения масс, плавучести, ходкости, остойчивости традиционного для буксиров и ледоколов вида.

Включённая в математическую модель процедура автоматизированного создания теоретического чертежа основана на следующих положениях. По длине судно подразделяется на носовое заострение, цилиндрическую вставку и кормовое заострение. Цилиндрическая вставка может отсутствовать.



**Рис. 1. Теоретический чертёж носовой оконечности проекта 1105(Капитан Чечкин), полученный с помощью программы генерирования теоретического чертежа**

Обводы носового заострения, главным образом влияющие на ледовое сопротивление на переднем ходу, а, следовательно, и определяющие мощность главной энергетической установки, создаются с помощью параметрических функций [7]. Параметрами, влияющими на форму носового заострения, являются: длина носового заострения, осадка и ширина по КВЛ, коэффициенты полноты полноты носового заострения, угол наклона диаметрального батокса к горизонту в районе КВЛ, угол притыкания КВЛ к ДП, параметры, характеризующие форму носовой ветви КВЛ. В качестве примера на рис. 1 приведён теоретический чертёж носовой оконечности ледокола проекта 1105, сгенерированный описываемой системой.

Для получения формы кормовой оконечности использован упрощённый подход. Известные, в том числе и используемые, методы расчёта ледового сопротивления не учитывают форму кормового заострения при движении ледокола передним ходом, т.е. математическая модель и критерии оптимизации оказываются малочувствительными по отношению к форме кормовой оконечности. Поэтому для получения замкнутой системы обводы кормы афинно перестраиваются с теоретических чертежей существующих речных ледоколов. Тип кормовых обводов определяется числом гребных винтов. Для двухвальной пропульсивной установки используются обводы ледокола проекта Р47, для трёхвальной – проекта 1105, четырёхвальной – проекта 1191.

В отдельный блок выделены трудоёмкие расчёты ледокольных геометрических характеристик теоретического чертежа, используемых при определении ледового сопротивления.

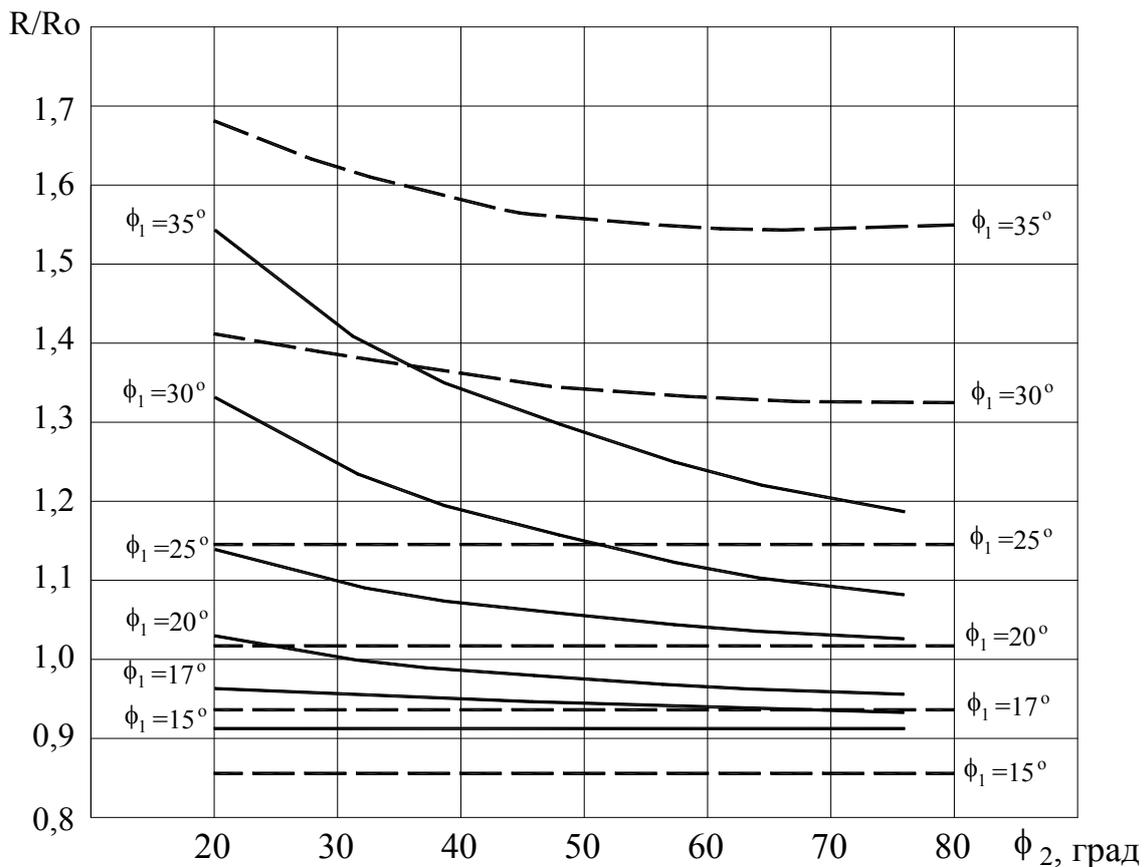


Рис. 2. Зависимости  $R/R_o$  от угла притыкания КВЛ к ДП  $\phi_2$  для разных значений угла наклона форштевня  $\phi_1$  при  $h = 0,3$  м;  $v = 3,2$  м/с ( — ) и при  $h = 0,7$  м;  $v = 1,0$  м/с ( - - - )

Блок расчётов ледовой ходкости включает методы расчёта ледового сопротивления в сплошном [2] и битых льдах [1], а также в сплошном льду, толщина которого превышает предельную [3], где ледокол движется набегам. Для расчёта винтов используются аппроксимированные диаграммы для расчёта гребных винтов ледоколов [8]. Этот блок имеет важное самостоятельное проектно-исследовательское значение. Он позволяет анализировать влияние параметров формы носовой оконечности и соотношений главных размерений на ледовое сопротивление. В качестве примера на рис. 2 показано влияние углов наклона форштевня к горизонту  $\phi_1$  и углов притыкания КВЛ к ДП  $\phi_2$  на ледовое сопротивление, отнесённое к сопротивлению базового проекта 1105 в различных ледовых условиях при работе ледокола на полную мощность.

На основе описанной математической модели разработан программный комплекс.

Оптимизация осуществляется методом автоматизированного перебора возможных вариантов оптимизируемых параметров из области допустимых значений. Процесс поиска оптимального решения при обосновании выбора основных проектных характеристик речного ледокола полностью автоматизирован на ПЭВМ и управляем в диалоговом режиме конструктором.

Конструктор имеет возможность задавать различные варианты технического задания, вводить или корректировать измерители масс и другие дополнительные параметры, контролировать поиск оптимального решения, в том числе просматривать создаваемые в процессе оптимизации теоретические чертежи. Конструктор имеет возможность анализировать корректность технического задания и вырабатывать, в случае необходимости, предложения по его изменению.

Система позволяет выполнять широкий круг математических экспериментов, направленных на получение данных, необходимых для выработки ледокольной концепции судна.

#### Библиографический список

1. **Ионов, Б.П.** Ледовая ходкость судов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.
2. **Грамузов, Е.М.** Полуэмпирическая модель ледового сопротивления речного ледокола / Е.М. Грамузов, П.А. Курнев // Вопросы проектирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. / Горьков. политехн. ин-т. – Горький, 1988. С. 36–42.
3. **Грамузов, Е.М.** Исследование параметров движения ледоколов набегами / Е.М. Грамузов, Н.В. Калинина // Теория, прочность и проектирование судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. / НГТУ. – Н.Новгород, 1995. С. 43–51.
4. **Зуев, В.А.** Оценка эффективности ледокольных средств / В.А. Зуев, В.В. Князьков // Речной транспорт. 1997. № 4. С. 32–33.
5. **Зуев, В.А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.
6. **Каштелян, В.И.** Оценка ледовых качеств ледоколов, отличающихся формой обводов корпуса, с учётом плавания в различных ледовых условиях // Теория, прочность и проектирование судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. / НГТУ. – Н. Новгород, 1995. С. 6–8.
7. **Грамузов, Е.М.** Генерирование теоретического чертежа при оптимизации основных проектных характеристик ледокола / Е.М. Грамузов, Н.Е. Тихонова // Современные технологии в кораблестроительном и энергетическом образовании, науке и производстве: сб. докл. Всероссийской науч.-техн. конф. / НГТУ. – Н. Новгород, 2006. С. 107–114.
8. **Игнатъев, М.А.** Гребные винты судов ледового плавания / М.А. Игнатъев. – Л.: Судостроение, 1966. – 114 с.

*Дата поступления  
в редакцию 18.06.2013*

**E.M. Gramuzov, N.E. Tikhonova**

#### JUSTIFICATION OF DESIGN CHARACTERISTICS OF RIVER ICEBREAKERS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Identification of the main elements of the shape of the body and especially in the design of the icebreaker is always closely linked to the provision of cross-ice.

In this article the approach to the design of river icebreaker through the optimization of its design characteristics is considered. Generalized optimization criteria are proposed. The components of the mathematical model of the vessel are considered. The mathematical model allowed us to develop a software system that automates the process of selecting the engineering characteristics of icebreakers. Optimization is carried out by the automated sorting options optimized parameters. The process of finding optimal solutions to justify the choice of the basic design characteristics of the river icebreaker is fully automated on the PC. Its management is a designer interactively. The system allows for a wide range of mathematical experiments to obtain the data needed to develop the concept of ice breaking ship.

*Key words:* river icebreaker design specifications, design, mathematical model, optimization.