

УДК 629.124.791

Н.Е. Тихонова

**ОПТИМИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ФОРМЫ КОРПУСА ЛЕДОКОЛА
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены математическая модель проектирования речного ледокола и обобщённые критерии оптимизации, учитывающие разнообразие ледовых условий в районе эксплуатации. Предложены способы задания ледовых условий. Показано влияние распределения ледовых условий на оптимальные проектные характеристики речного ледокола. Произведено сравнение оптимальных вариантов с существующими речными ледоколами.

Ключевые слова: ледовые условия, ледокол, основные элементы, форма корпуса, критерии оптимизации.

Структура ледовых условий для разных районов внутренних водных путей существенно различается [1, 2, 3]. В настоящей работе исследуется, каким образом район эксплуатации, а, следовательно, и распределение ледовых условий влияют на выбор основных элементов и формы корпуса речного ледокола.

Факт зависимости оптимальной формы носовой оконечности морского ледокола от ледовых условий, полученный с помощью расчётных методов и модельных испытаний, отмечен еще в работе [4]. Настоящее исследование базируется на теоретических методах и осуществляется с помощью математической модели проектирования речного ледокола. Математическая модель включает аналитические уравнения проектирования, ограничения, генерирование теоретического чертежа, алгоритмы расчёта ледовой ходкости, алгоритмы проверочных общесудовых расчётов. В состав системы аналитических уравнений проектирования включены уравнения масс, плавучести, ходкости, остойчивости. Ледовое сопротивление рассчитывается методом [2, 5], наиболее полно учитывающим форму корпуса ледокола.

Следует отметить, что исследование влияния формы корпуса на ледовую ходкость в отрыве от главных размерений недостаточно корректно. Это объясняется тем, что изменение формы корпуса влечёт за собой изменение коэффициентов полноты, а, следовательно, и других проектных характеристик.

В указанной математической модели проектирования ледокола все основные проектные характеристики, включая форму корпуса, взаимно увязаны с помощью аналитических уравнений проектирования, перечисленных выше.

Математическая модель позволяет оптимизировать основные проектные характеристики ледокола, а именно: водоизмещение, главные размерения, мощность главных двигателей, число и геометрические характеристики гребных винтов, параметры, характеризующие форму носовой оконечности.

Разнообразие ледовых условий может быть представлено в виде некоторой матрицы распределения ледовых условий по району плавания или просто матрицы ледовых условий. Следует отметить, что речные ледоколы в основном работают на разрушение сплошного ледяного покрова. Другие ледовые условия если и встречаются, то занимают малую долю от общего времени работы ледокола во льдах. Поэтому в данной работе ограничимся рассмотрением ледовых условий, включающих сплошной ледяной покров разной толщины. Матрица ледовых условий может иметь, например, следующий вид.

Таблица 1

Матрица ледовых условий

Толщина льда	h_1	h_2	...	h_n	$\Sigma d_i = 1$
Доля данной толщины льда	d_1	d_2	...	d_n	

Доля толщины льда d_i в зависимости от способа задания ледовых условий может быть представлена двояко [2, 5]. В первом случае это относительное время плавания \bar{t}_i ($\Sigma \bar{t}_i = 1$) в конкретных ледовых условиях. Во втором случае это относительная протяжённость участка трассы \bar{l}_i ($\Sigma \bar{l}_i = 1$) с постоянными ледовыми условиями. В зависимости от представления d будем говорить о первом и втором способах задания ледовых условий. Оптимизация осуществляется по обобщённым критериям [2, 3]. Для первого способа задания ледовых условий обобщённые критерии выглядят следующим образом:

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

При задании ледовых условий вторым способом обобщённые критерии будут иметь вид:

$$K_1 = q_T \sum (N_i / v_i) \bar{l}_i; \quad K_2 = \sum (C_i / v_i) \bar{l}_i,$$

где K_1 - относительный расход топлива главными двигателями на ледокольную работу, кг/км; K_2 - удельные приведённые затраты на ледокольную работу, тыс. руб./км; C - приведённые затраты, руб/ч; v - скорость судна, км/ч; N - суммарная мощность на гребных валах, кВт; q_T - удельный расход топлива главными двигателями, кг/кВт·ч.

Критерии оптимизации называются обобщёнными по той причине, что они учитывают разнообразие ледовых условий в районе эксплуатации, и для одного и того же судна критерии принимают различные значения в зависимости от задания распределения ледовых условий. Математическая модель проектирования речного ледокола реализована в виде пакетов прикладных программ для ПЭВМ и позволяет решать оптимизационные задачи для любого содержания матрицы ледовых условий.

Для того чтобы наиболее наглядно и выпукло проиллюстрировать влияние структуры ледовых условий на результат оптимизации проектных характеристик ледокола, приведём некоторые гипертрофированные примеры. Будем считать, что ледокол проектируется на преодоление сплошного льда толщиной 0,75 метра непрерывным ходом. Рассмотрим следующие варианты задания ледовых условий. Во всех вариантах ледовые условия будем задавать вторым способом, то есть через относительные протяжённости участков трассы.

В одном случае в районе эксплуатации встречается лёд одной толщины – 0,75 метра (1-й вариант).

Согласно другому варианту задания, в районе эксплуатации встречаются две толщины льда: толстый лёд (толщиной 0,75 м) и тонкий лёд (0,4 м). Рассмотрим разные распределения между тонким и толстым льдом. В одном случае примем, что толстый лёд составляет 90% от длины трассы, а тонкий – 10% (2-й вариант), а в другом случае – наоборот (3-й вариант).

Другие элементы технического задания на проектирование, включающие ширину канала или ширину судна, максимальную осадку, автономность и число членов экипажа, примем как у речных ледоколов проектов 1105 и 1191. Эти ледоколы отличаются лишь максимальной осадкой, которая при полных запасах составляет у ледокола проекта 1105 – 3,6 метра, а у ледокола проекта 1191 – 2,8 метра. Ширина судов обоих проектов при указанных осадках составляет 16,2 метра. Число винтов, тип кормового заострения, диаметр винтов и шаговое отношение будем принимать как у одного из указанных проектов соответственно осадке.

Таким образом, учитывая три варианта задания ледовых условий, описанных ранее, и два варианта остальных элементов технического задания на проектирование, имеем шесть вариантов задания на оптимизацию ледокола. Варианты 1,2 и 3 соответствуют техническому заданию на проектирование ледокола проекта 1105 и соответственно 1,2 и 3 вариантам задания ледовых условий. Варианты 4,5 и 6 соответствуют техническому заданию на проектирование ледокола проекта 1191 и соответственно 1,2 и 3 вариантам задания ледовых условий.

Результаты оптимизации по 1 и 2 вариантам задания оказались одинаковыми, что объясняется малым различием в ледовых условиях. То же самое можно сказать о вариантах 4 и 5. Поэтому варианты 2 и 5 из дальнейшего рассмотрения исключаем.

На рис. 1 и 2 приведены теоретические корпуса носовой оконечности ниже КВЛ ледоколов проектов 1105 и 1191. А на рис. 3, 4, 5, 6 приведены теоретические корпуса ледоколов, полученные в результате оптимизации по описанным техническим заданиям.

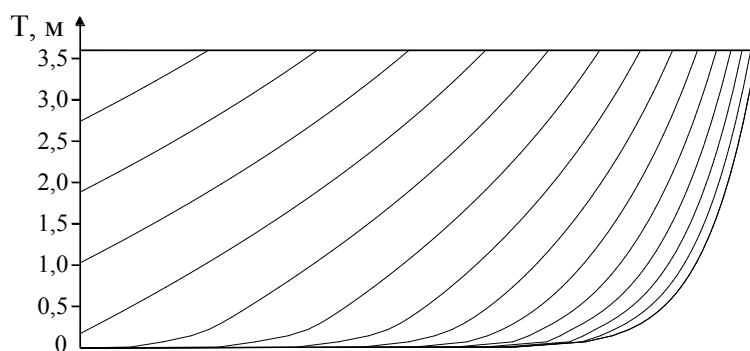


Рис. 1. Теоретический корпус носовой оконечности ледокола проекта 1105 ниже КВЛ

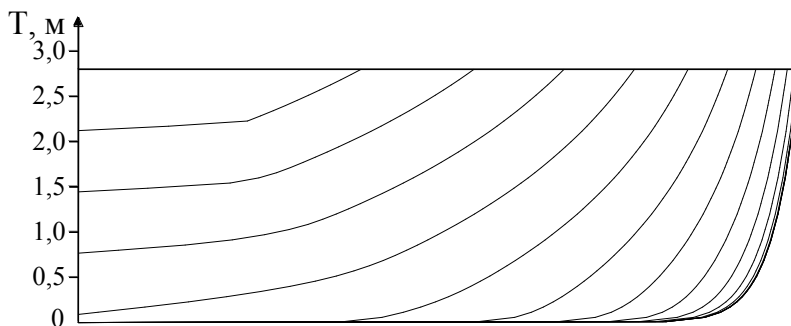


Рис. 2. Теоретический корпус носовой оконечности ледокола проекта 1191 ниже КВЛ

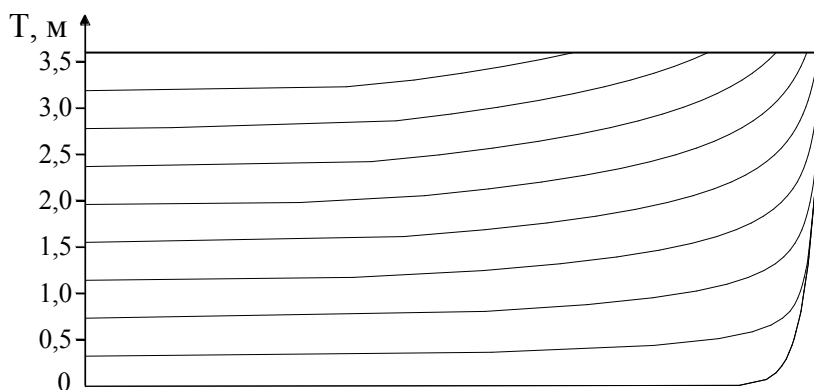


Рис. 3 Теоретический корпус носовой оконечности варианта 1 ниже КВЛ

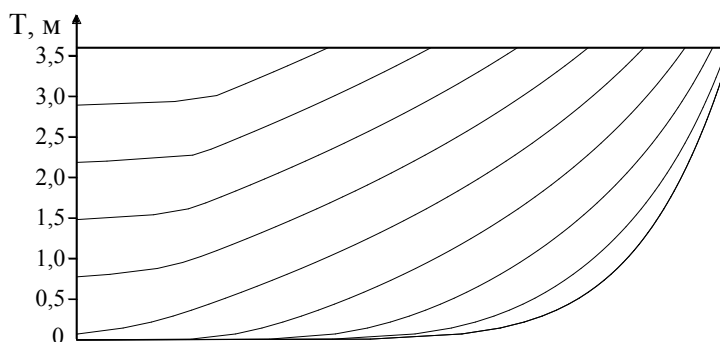


Рис. 4. Теоретический корпус носовой оконечности варианта 3 ниже КВЛ

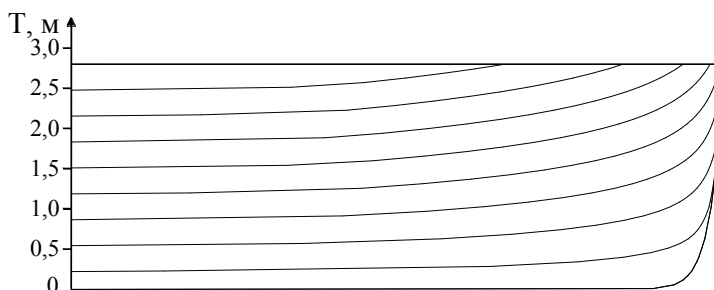


Рис. 5. Теоретический корпус носовой оконечности варианта 4 ниже КВЛ

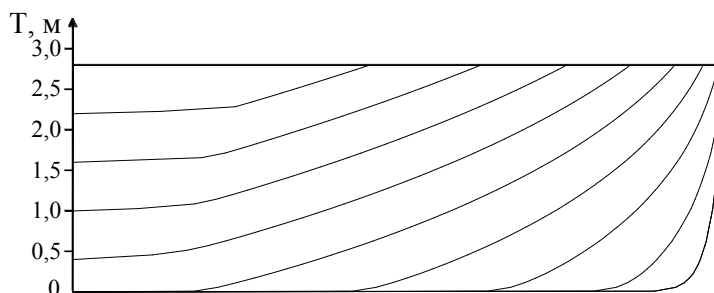


Рис. 6. Теоретический корпус носовой оконечности варианта 6 ниже КВЛ

В табл. 2 приведены основные элементы ледоколов проектов 1105 и 1191 и вариантов проектов, полученных в результате оптимизации. В графах таблицы, соответствующих критериям оптимизации и средней скорости проектов 1105 и 1191 значения над чертой относятся к первому варианту задания ледовых условий, а под чертой – к третьему. Как видно из таблицы, соотношение K_1/K_2 является довольно стабильным, т. е. удельные приведённые затраты на ледокольную работу прямо пропорциональны относительному расходу топлива главными двигателями.

Из табл.2 видно, что для рассматриваемых ледовых условий критерии ледоколов с проектными характеристиками, полученными в результате оптимизации, оказались лучше соответствующих критериев речных ледоколов проектов 1105 и 1191. Особенно разница заметна для случая, когда в качестве ледовых условий принимался толстый лёд на всём протяжении трассы. Также можно увидеть, что между проектом 1191 и соответствующими ему оптимальными вариантами существует меньший разрыв в критериях оптимизации по сравнению с ледоколом проекта 1105. Это объясняется тем, что ледокол проекта 1191 более поздней постройки и имеет форму корпуса близкую к современным обводам.

Таблица 2

Основные элементы, параметры и критерии оптимизации разных вариантов проекта речного ледокола

Обозначение проекта или варианта	проект 1105	проект 1191	вариант 1	вариант 3	вариант 4	вариант 6
Длина по КВЛ L , м	73	73	64,8	60,8	68,9	64,8
Ширина по КВЛ B , м	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2
Осадка T , м	3,6	2,8	3,6	3,6	2,8	2,8
Длина цилиндрической вставки $L_{\text{цил.}}$, м	7,1	27,4	18	4	45	30
Длина носового заострения $L_{\text{н.з.}}$, м	33	31	13,75	23,7	9,2	20,15
Коэффициент полноты водоизмещения δ	0,60	0,74	0,673	0,53	0,795	0,717
Коэффициент полноты носового заострения $\delta_{\text{н.з.}}$	0,55	0,68	0,45	0,45	0,45	0,525
Коэффициент полноты мидель-шпангоута β	0,93	0,965	0,98	0,88	0,98	0,98
Коэффициент полноты носовой ветви КВЛ $\alpha_{\text{н.з.}}$	0,72	0,83	0,9	0,75	0,9	0,8
Угол наклона форштевня к горизонту φ_1	20	17	15	15	17	15
Угол притыкания КВЛ к ДП φ_2	35	90	90	90	90	90
Число винтов z	3	4	3	3	4	4
Шаговое отношение H/D	0,55	0,74	0,55	0,55	0,74	0,74
Водоизмещение с полными запасами D , т	2554	2450	2543	1877	2483	2108
Мощность на фланцах двигателей N , кВт	4650	4815	4575	3330	4909	4141
Автономность A , сут.	20	20	20	20	20	20
Число членов экипажа n , чел.	28	28	28	28	28	28
K_1 , кг/км	385/127	388/120	194	83	273	103
K_2 , тыс. руб./км	1,8/0,6	1,8/0,55	0,93	0,4	1,21	0,46
Средняя скорость прохождения трассы $v_{\text{ср.}}$	0,67/2,04	0,69/2,24	1,31	2,24	1,0	2.23
K_1/K_2	214/210	216/218	209	208	226	224

На рис. 7 и рис. 8 приведены диаграммы ледопроеходимости ледоколов проектов 1105 и 1191 и рассматриваемых вариантов проектов.

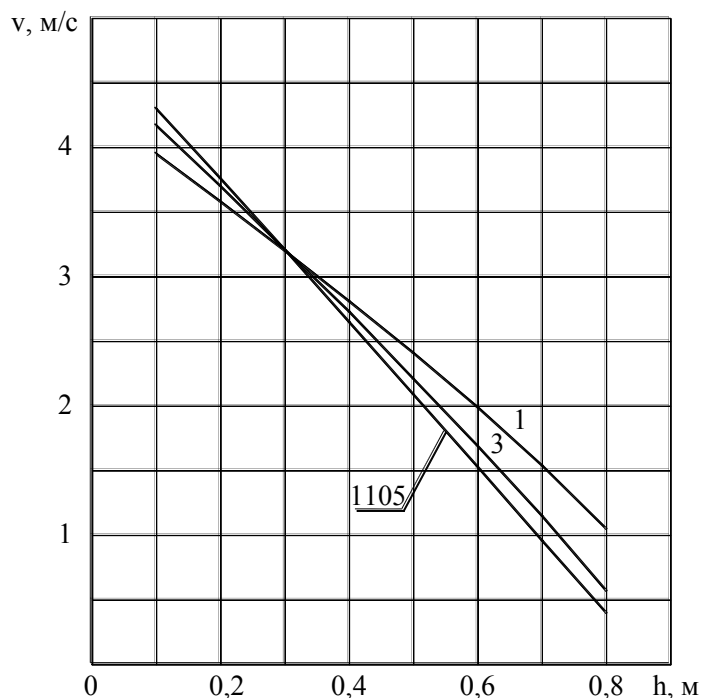


Рис. 7. Диаграммы ледопроеходимости ледокола проекта 1105 и вариантов проектов 1 и 3

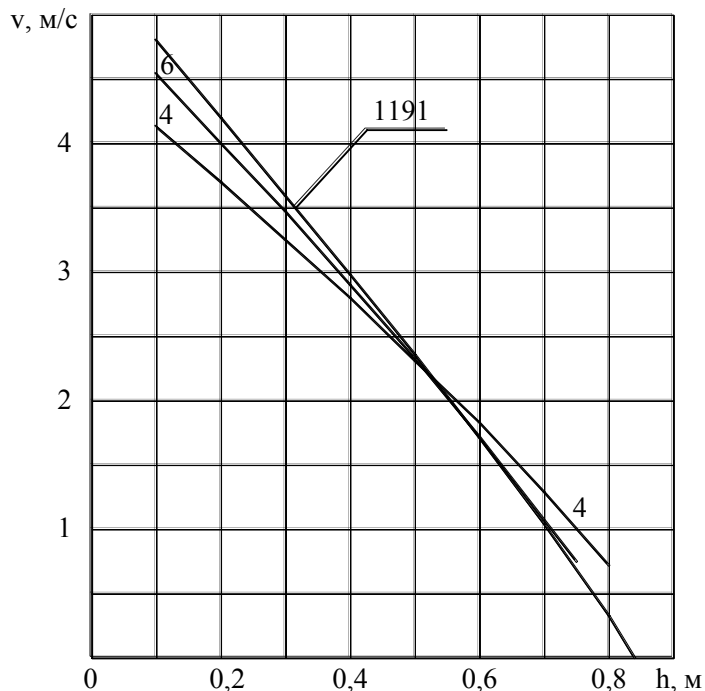


Рис. 8. Диаграммы ледопроеходимости ледокола проекта 1191 и вариантов проектов 4 и 6

Анализ результатов оптимизации показывает следующее. Проектные характеристики судов, получаемых в результате оптимизации, зависят от ледовых условий, для работы в которых проектируется судно. Это объясняется изменением баланса составляющих ледового сопротивления в зависимости от ледовых условий. При малых толщинах льда и относительно больших скоростях существенную роль играют скоростные составляющие сопротивления обломков – инерционная и гидродинамическая. Оптимальные корпуса для толщины льда,

близкой к предельной, имеют большую цилиндрическую вставку и форму обводов носового заострения с очень полными ватерлиниями. Такие обводы обеспечивают минимум сопротивления разрушению льда. Для более лёгких ледовых условий, напротив, необходимо уменьшать скоростную составляющую сопротивления. Это достигается применением более острых обводов для носовой оконечности судна.

Наличие у оптимальных корпусов большой цилиндрической вставки, особенно у спроектированных для толстого льда, можно объяснить следующим образом. Применение цилиндрической вставки позволяет получить большее водоизмещение при данных главных размерениях и, следовательно, большую мощность энергетической установки. Наибольшей длины цилиндрическая вставка достигает при существенном ограничении осадки, что можно увидеть на примере ледокола проекта 1191 и вариантов, полученных путём оптимизации при той же осадке. С другой стороны, увеличение длины цилиндрической вставки при малых скоростях движения судна слабо сказывается на увеличении ледового сопротивления.

Следует отметить, что полученные оптимальные корпуса для толстого льда не противоречат применяемым в последнее время новым формам обводов корпуса. В качестве примера можно привести австрийский ледокол “Röthelstein” постройки 1996 года.

С помощью математической модели проектирования речного ледокола осуществляется приоритетное проектирование на работу во льду. Если предполагается двойное использование ледокола или если проектант не устраивают главные размерения или обводы корпуса, полученные в результате оптимизации, математическая модель позволяет ограничить один или несколько параметров оптимизации с тем, чтобы найти оптимальный вариант в пределах заданных ограничений.

Библиографический список

1. **Ионов, Б.П.** Ледовая ходкость судов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение. 2001. – 512 с.
2. **Ионов, Б.П.** Проектирование ледоколов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов, В.А. Зуев. – СПб.: Судостроение. 2013. – 512 с.
3. **Зуев, В.А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 207 с.
4. **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.
5. **Зуев, В.А.** Обоснование выбора проектных характеристик речных ледоколов / В.А. Зуев, Н.Е. Тихонова // 3-я международная конференция по морским интеллектуальным технологиям: мат. конференции, сб. докладов. – С. Петербург, 1999. Т1. С. 42–45.

*Дата поступления
в редакцию 11.12.2014*

N.E. Tikhonova

OPTIMIZING OF THE BASIC ELEMENTS AND SHELL ARCHITECTURE OF AN ICEBREAKER DEPENDING ON THE ICE CONDITIONS

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

A mathematical model of the design of river icebreakers and generalized optimization criteria considering the variety of ice conditions in the area of operation are presented. The ways of ice conditions setting are suggested. The effect of the distribution of ice conditions on the optimal design characteristics of river icebreaker is showed. Comparison of the best options with existing river icebreakers is made.

Key words: ice conditions, icebreaker, basic elements, shell architecture, optimization criteria.