

УДК 629.5.01: 629.5.022.25

А.В. Бондаренко, доцент, канд. техн. наук,

А.П. Бойко, доцент, канд. техн. наук

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

пр. Героев Сталинграда 9, г. Николаев, Украина, 54025

E-mail: Oleksandr.Bondarenko@nuos.edu.ua

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДОВ С МАЛОЙ ПЛОЩАДЬЮ ВАТЕРЛИНИИ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Рассматриваются особенности выбора оптимальных проектных характеристик судов с малой площадью ватерлинии по сравнению с традиционными судами. Приводится описание математической модели и модели функционирования судна. Обоснован метод оптимизации.

Ключевые слова: судно с малой площадью ватерлинии, математическая модель, ограничения, целевая функция, оптимизация.

Постановка проблемы. Суда с малой площадью ватерлинии (СМПВ) благодаря особенностям формы корпуса обладают превосходными мореходными качествами и применяются в качестве лоцманских, научно-исследовательских, пассажирских, патрульных, прогулочных яхт. Ввиду новизны опыт проектирования этого типа судов небольшой.

Следует учитывать, что в условиях острой конкуренции за очень короткий срок необходимо разработать наилучший вариант судна, превосходящий конкурирующие проекты. Использование традиционных способов проектирования по прототипу или метода вариаций хотя и позволяет получить проект СМПВ, удовлетворяющий требованиям задания, но не гарантирует его высокой экономической эффективности. Необходим переход к оптимальному проектированию. Задача повышения качества принимаемых решений на начальных этапах проектирования судов с малой площадью ватерлинии является весьма актуальной.

Анализ достижений и публикаций. Выполненный обзор отечественных и зарубежных публикаций показал, что имеется незначительное количество работ, посвященных применению оптимизационного подхода при проектировании СМПВ, например [1, 2]. Анализ этих работ позволяет сделать вывод о вопросах, требующих дальнейшего изучения:

1. В большинстве моделей рассматриваются детерминированные задачи, что не позволяет учесть влияние неопределенности исходной информации на эффективность проекта.

2. Вопросы безопасности судна, как правило, сводятся к выполнению требований к мореходным качествам судна и не учитывают фактор надежности. На начальных этапах проектирования практически не устанавливаются требования к комфортности пассажиров.

Целью данной статьи является рассмотрение основных особенностей выбора оптимальных проектных характеристик судов с малой площадью ватерлинии с учетом неопределенности исходной информации.

Изложение основного материала. Основой для разработки проекта судна является техническое задание (вектор C), содержащее установленные заказчиком характеристики СМПВ.

Обозначим через $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ вектор независимых переменных. Если эффективность судна оценивать с помощью критерия $f(X, C)$, а его качества описывать функциями $g_j(X)$, то можно определить такие элементы судна, при которых:

критерий экономической эффективности принимает экстремальное значение $f(X, C) \rightarrow \min(\max)$;

выполняются требования к качествам судна $g_j(X) \geq 0, j = 1, \dots, m$;

значения элементов лежат в допустимых пределах $x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}$,

где m – количество ограничений задачи; x_i^{\min} , x_i^{\max} – минимальное и максимальное значение независимой переменной; n – количество независимых переменных.

Оптимизационная задача носит нелинейный характер и условно разделяется на две части. Первая – связана с разработкой математической модели судна, а вторая – предусматривает выбор метода поиска оптимального решения.

Указанные части для каждого конкретного типа судна имеют свои особенности, влияющие на весь процесс решения задачи. В частности для СМПВ можно выделить следующие особенности.

Первой особенностью СМПВ, как объекта оптимизации, является многообразие применяемых при их создании технических решений в части принципиальных проектных и конструктивных компоновок и

их возможных сочетаний. Проведенные исследования позволили выявить существенные изменения характера взаимосвязей между основными конструктивными элементами СМПВ по сравнению с общеизвестными для однокорпусных судов. Так, например, при двухкорпусной конструкции увеличивается зависимость проектных характеристик от размеров и конфигурации корпусов и стоек, значительно меняется характер воздействия внешних нагрузок (наиболее важными становятся силы и моменты, действующие в поперечном направлении), изменяется значимость составляющих силы полного сопротивления, а, следовательно, и конструктивные меры по ее уменьшению.

Возможные варианты соотношения размеров корпусов, стоек и параметров формы настолько разнообразны, что при их обосновании необходимо выполнение значительного объема исследовательских работ. Даже небольшие изменения параметров формы корпуса при увеличении или уменьшении водоизмещения существенно влияют на требуемую мощность энергетической установки и нагрузку масс. Аналогичное влияние они оказывают на мореходность СМПВ. Так, по данным работы [3], для лоцманского судна с малой площадью ватерлинии на этапе эскизного проекта необходимо было выполнить 120 шагов проектирования, каждый из которых включал расчет сопротивления и проверку мореходности. Такое количество вариантных проработок можно выполнить, только применяя специализированные программные продукты. Кроме того, форма корпуса, полученная в результате автоматизированного проектирования, должна быть приспособлена к возможности размещения энергетической установки, рулей.

Второй особенностью СМПВ является то, что процесс оптимального проектирования СМПВ более сложен, чем традиционного однокорпусного судна и катамарана с обычными обводами. Известно, что все качества однокорпусного судна в основном определяются его главными размерениями (длиной, шириной, осадкой и высотой борта), коэффициентом общей полноты. У катамаранов с обычными обводами еще добавляются горизонтальный и вертикальный клиренсы (таблица 1). А в случае СМПВ необходимо учитывать геометрические характеристики и параметры формы не только каждого отдельного корпуса, но и стоек, а также гидродинамическое взаимодействие погруженных корпусов и стоек (рисунок 1).

Таблица 1 – Количество независимых переменных и их комбинаций

Тип судна	L	B	D	d	C_b	Кол-во переменных	Кол-во комбинаций
Однокорпусное	1	1	1	1	1	5	$3^5 = 243$
Катамаран	1	3	2	1	1	8	$3^8 = 6561$
СМПВ	3	4	3	1	1	12	$3^{12} = 531441$

Кроме того, при проектировании СМПВ необходимо учитывать тот факт, что действующие на него внешние силы определяются не только геометрическими характеристиками корпусов, стоек и их связей, но и их взаимным расположением.

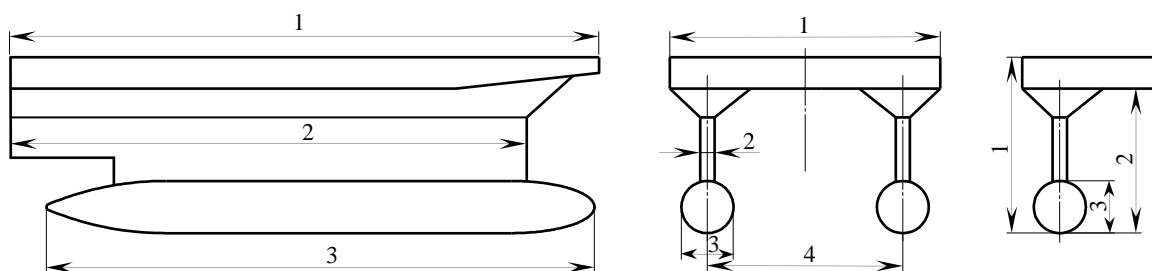


Рисунок 1 – Схема независимых переменных СМПВ

Следующей особенностью является отсутствие достаточного опыта проектирования и постройки, а также незначительное количество построенных судов, которые можно использовать в качестве прототипов. В настоящее время в мире построено около 80-ти судов из которых только 20 – пассажирские.

При разработке проекта СМПВ требуется обоснование тех характеристик, которые не входят в задание на проектирование, но в тоже время заметно влияют на эффективность СМПВ, а именно: выбор конструктивно-компоновочного типа: мономаран, катамаран, тримаран и прочие варианты, количество стоек; выбор конструкционных материалов с возможностью комбинированных вариантов, различных для корпуса и надстройки: сталь, алюминий, стеклопластик; обоснование спектра уровней комфортности с распределением пассажиров по категориям, а также по ярусам и местоположению салонов или кают по

длине судна; обоснование спектра дальностей плавания и заданных уровней мореходности в сочетании со значениями максимальной и эксплуатационной скоростей хода.

Разработка схем общего расположения судна также требует особого внимания в связи с тем, что большие площади палуб СМПВ обуславливают принципиально новую пространственную структуру судна и представляют практически неограниченные возможности в организации обитаемого пространства.

При решении оптимизационной задачи следует учитывать наличие и достоверность исходной информации экономического характера, используемого при оценке эффективности судна. Очень трудно на этапе разработки проекта определиться со стоимостью топлива, величиной расходов на экипаж, портовыми сборами и т.д. Эти характеристики меняются даже в течение одного сезона, не говоря уже о 15–25 годах эксплуатации. Поэтому учет нестабильности экономической ситуации, по мнению авторов, целесообразно провести путем перехода к стохастической постановке оптимизационной задачи.

Исходя из вышеизложенного для нахождения оптимальных элементов судна авторами разработана математическая модель судна и модель функционирования.

Математическая модель судна с малой площадью ватерлинии содержит аналитические зависимости, позволяющие определить (рисунок 2): геометрические характеристики судна; водоизмещение порожнем и дедвейт; вместимость (требуемые площади пассажирских салонов, служебных, общественных и санитарных помещений); начальную остойчивость и параметры диаграммы статической остойчивости; геометрические характеристик успокоителей качки (носовых и кормовых стабилизирующих рулей); показатели мореходности судна; строительную стоимость судна.

Эксплуатационные расходы и показатели экономической эффективности СМПВ определяются путем экономического анализа в модели функционирования. *Модель функционирования* позволяет рассматривать работу судна в динамике с учетом воздействия случайных факторов. Случайные факторы от воздействия внешней среды, в основном определяются гидрометеорологическими условиями, характерными для рассматриваемого района эксплуатации, а также неопределенностью исходных данных, используемых в расчетах эксплуатационно-экономических показателей.

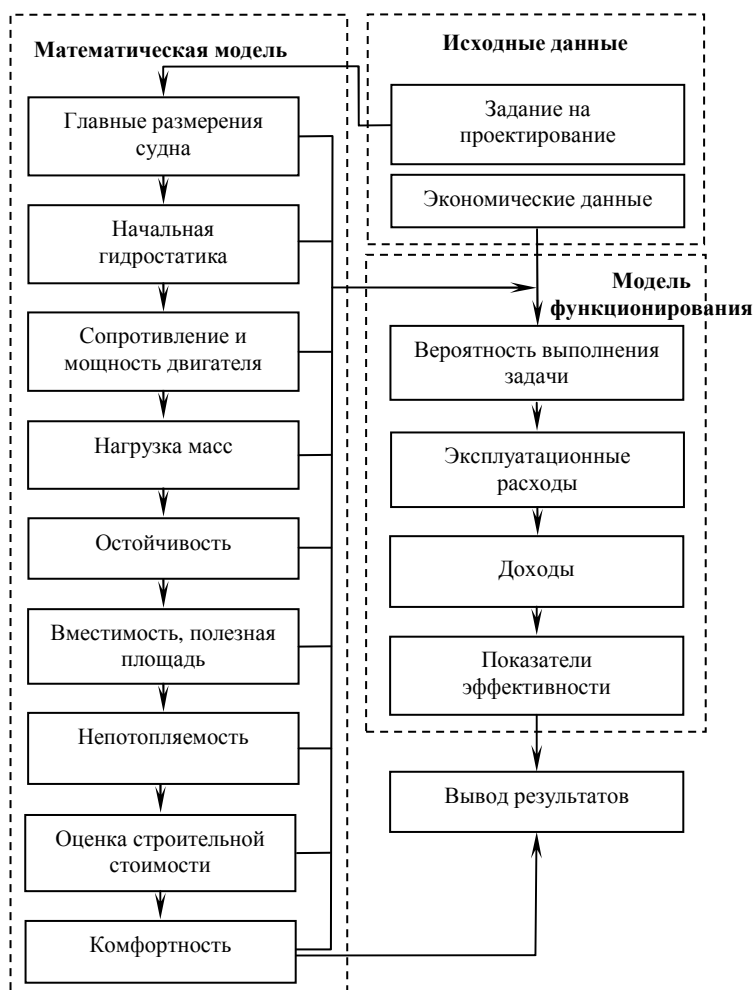


Рисунок 2 – Блок-схема математической модели и модели функционирования СМПВ

Экономический анализ предусматривает расчет одного из выбранных показателей эффективности судна: чистого дисконтированного дохода, минимальной фрахтовой ставки, срока окупаемости инвестиций, чистой прибыли и индекса доходности.

Эксплуатационные расходы определяются в виде суммы следующих составляющих:

$$C_O = C_{Fix} + C_{Var},$$

где C_{Fix} – постоянные расходы; C_{Var} – переменные расходы.

Постоянные эксплуатационные расходы зависят от численности экипажа, строительной стоимости судна и рассчитываются по формуле

$$C_{Fix} = C_{Crew} + C_M + C_{IS} + C_D + C_{Of},$$

где C_{Crew} – расходы на содержание экипажа; C_M – расходы на ремонт и снабжение; C_{IS} – расходы на страхование; C_D – амортизационные расходы; C_{Of} – административно-управленческие, береговые расходы.

Переменные эксплуатационные расходы включают в себя следующие составляющие

$$C_{Var} = C_P + C_F + C_{Oil},$$

где C_P – затраты в порту; C_F – расходы на топливо; C_{Oil} – расходы на смазочное масло.

Оценка экономической эффективности СМПВ производится с учетом факторов риска и вероятности выполнения задачи на протяжении всего жизненного цикла. Для пассажирских судов, совершающих регулярные перевозки, вероятность выполнения задачи связана со значением вероятности выполнения рейса в соответствии с заданным расписанием. На начальных этапах проектирования она может быть определена как $P = P_1 P_2 P_3 P_4$, где P_1 – вероятность выполнения рейса; P_2 – вероятность поддержания заданной средней скорости во время перехода; P_3 – экономические риски (вероятность получения неотрицательной прибыли); P_4 – надежность, т.е. вероятность безаварийной работы судовых конструкций и оборудования.

Значения вероятностей выполнения задачи, а также параметров закона распределения критерия оптимизации определяются с помощью имитационного моделирования элементов рейса судна.

Имитационное моделирование (ИМ) [4] основано на воспроизведении с помощью ЭВМ развернутого во времени процесса функционирования судна с учетом взаимодействия с внешней средой. Процесс функционирования СМПВ представляется в виде последовательного описания процесса эксплуатации судна между пунктом отправления и пунктом назначения, обработки его в портах и т.д., с учетом гидро- и метеоусловий. В результате такого моделирования фиксируются определенные события и состояния, по которым вычисляются характеристики эффективности системы.

Основные этапы имитационного моделирования: сбор и статистическая обработка экономических данных с целью определения законов распределения; генерация случайных чисел с заданными законами распределения с помощью датчиков случайных чисел; построение и реализация модели функционирования судна; проведение имитационного эксперимента; статистическая обработка результатов моделирования.

Блок-схема процедуры имитационного моделирования приведена на рисунке 3.

На выбор метода оптимизации оказывает влияние размерность вектора независимых переменных, наличие ограничений, нелинейность критерия и ограничений задачи. По результатам анализа для решения поставленной задачи предлагается использовать генетический алгоритм (ГА). ГА – это простая модель эволюции в природе, реализованная в виде компьютерной программы [5]. В генетическом алгоритме используются аналоги механизма генетического наследования и естественного отбора.

В общем случае стратегия поиска ГА описывается следующим циклом. На первой итерации формируется начальная "популяция" (совокупность вариантов проектных решений). Далее для каждой "особи" (решения задачи) вычисляются значения функции приспособленности, по величине которой определяется наилучшая "особь". Затем ГА генерирует новую "популяцию" с использованием генетических операторов отбора, скрещивания, мутации и стратегии элитизма (при необходимости). Для новой "популяции" проводится оценивание значения функции приспособленности и так далее. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет выполнено одно из условий завершения поиска.

Авторами разработана методика и программное обеспечение, которые позволяют получить оптимальные характеристики пассажирских СМПВ. Работоспособность методики проиллюстрирована на примере решения задачи выбора оптимальных характеристик пассажирского СМПВ для линии "Одесса – Варна". В расчете использованы экономические данные в ценах 2010 года и расписание движения катамарана "Крымская стрела". При расчете капитальных вложений в постройку судна предполагается, что собственные денежные средства заказчика составили 20 %, а остальные 80 % инвестиций – это банковский кредит, взятый на восемь лет под процентную ставку – 6...10 % в год. Жизненный цикл судна принят равным 15 годам.

В качестве показателя экономической эффективности использовался чистый дисконтированный доход. Значения оптимизируемых переменных и основные характеристики СМПВ для пассажирских перевозок на маршруте "Одесса–Варна", полученные в результате работы оптимизационной программы, приведены в таблицах 2 и 3 соответственно.

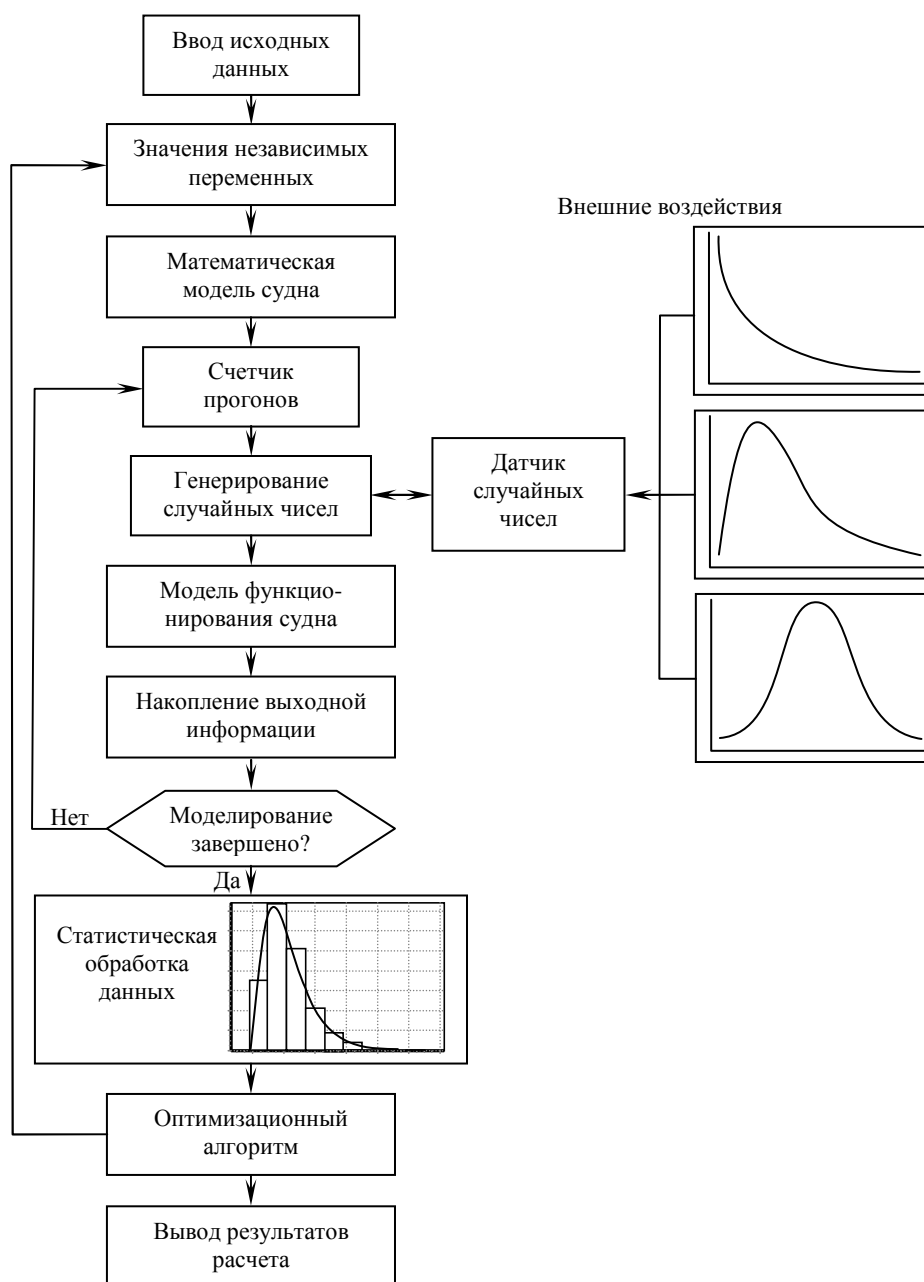


Рисунок 3 – Блок-схема имитационного моделирования

Таблица 2 – Значения оптимизируемых переменных

Независимая переменная	Вид материала корпуса и надстройки		
	Сталь	Алюминиевый сплав	Сталь + алюминиевый сплав
Относительное удлинение подводного корпуса L_H/D_H	11,883	14,705	12,270
Отношение длины стойки к ее ширине L_S/t_S	22,508	19,910	24,388
Коэффициент полноты площади ватерлинии стоек C_{WPS}	0,849	0,873	0,853
Относительная площадь ватерлинии $A_{WPS}/\nabla^{2/3}$	1,310	1,378	1,084

Продолжение таблицы 2

Независимая переменная	Вид материала корпуса и надстройки		
	Сталь	Алюминиевый сплав	Сталь + алюминиевый сплав
Отношение горизонтального клиренса к длине судна B_S/L_{OA}	0,408	0,383	0,400
Отношение осадки судна к диаметру погруженного корпуса d/D_H	1,417	1,617	1,421
Отношение ширины погруженного корпуса к его высоте B_H/H_H	1,301	1,092	1,190
Коэффициент продольной полноты подводного корпуса C_{PH}	0,891	0,868	0,880
Параметр формы носового заострения погруженного корпуса n_f	2,275	3,833	3,818
Параметр формы кормового заострения подводного корпуса n_a	2,244	3,996	2,233
Параметр формы поперечного сечения подводного корпуса n_h	4,617	2,506	4,164
Параметр формы заострений стойки n_s	3,906	2,553	2,508
Относительный выдвиг стойки L_{CS}/L_H	-0,019	0,002	0,014

Таблица 3 – Основные характеристики СМПВ для линии Одесса–Варна

Наименование характеристики	Оптимальное значение		
	Сталь	Алюминиевый сплав	Сталь + алюминиевый сплав
Длина подводного корпуса, м	25,755	25,123	25,808
Ширина подводного корпуса, м	2,472	1,786	2,295
Высота подводного корпуса, м	1,9	1,635	1,928
Длина носового заострения подводного корпуса, м	3,863	3,768	3,871
Длина кормового заострения подводного корпуса, м	3,963	9,731	5,887
Длина стойки, м	26,024	20,888	23,734
Ширина стойки, м	1,156	1,049	0,973
Высота стойки, м	2,885	2,752	2,817
Длина носового заострения стойки, м	6,506	5,222	5,934
Длина кормового заострения стойки, м	10,852	6,672	8,994
Коэффициент полноты площади ватерлинии стойки	0,849	0,873	0,853
Вертикальный клиренс, м	2,092	1,743	2,005
Горизонтальный клиренс, м	10,507	9,628	10,328
Осадка, м	2,693	2,643	2,740
Высота борта до главной палубы, м	5,79	5,367	5,749
Длина наибольшая, м	26,378	25,123	25,808
Длина платформы, м	26,378	25,123	25,808
Ширина платформы, м	12,979	11,413	12,623
Высота моста платформы, м	1,004	0,98	1,004
Водоизмещение, т	250	150	225
Дедвейт, т	39,26	34,75	37,95
Мощность главных двигателей максимальная, кВт	2×3460	2×2300	2×3460
Мощность ДГ, кВт	190	190	190
Экипаж, чел.	5	5	5
Строительная стоимость судна, тыс. у.е.	4857	3752	4767
Период окупаемости, лет	9,3	5,9	8,4
Чистый дисконтированный доход, тыс. у.е.	2390	4357	2427

Для определения основных характеристик СМПВ в качестве метода оптимизации использовался генетический алгоритм со следующими параметрами: размер популяции – 50 хромосом; разрядность генов – 32 бита; вероятность кроссовера – 0,9; вероятность мутации – 0,1; вероятность инверсии – 0,05; начальное значение штрафа – 0,5; точность достижения экстремума – 0,000001. При оптимизации использовалась стратегия элитизма. Данные параметры установлены опытным путем в результате выполнения множества тестовых запусков программы.

Как показали результаты расчета, наиболее выгодным, с точки зрения экономической эффективности, является вариант СМПВ, выполненный из алюминиевого сплава, так он приносит наибольший доход при наименьших затратах и имеет меньший период окупаемости.

Выводы

1. СМПВ является более сложным для оптимизационных исследований объектом, чем традиционные однокорпусные суда и катамараны с обычными обводами. Это связано с многообразием применяемых технических решений в части проектных и конструктивных компоновок и их возможных сочетаний, сложностью процесса оптимизации, отсутствием достаточного опыта проектирования и постройки.

2. Общая постановка задачи оптимального проектирования СМПВ характеризуется большой размерностью пространства независимых переменных, наличие ограничений, необходимость учета случайных и неопределенных воздействий внешней среды. Процесс решения такой задачи СМПВ предусматривает использование метода штрафных функций – для учета ограничений, генетического алгоритма – для направленного поиска оптимума, имитационного моделирования – учета неопределенности данных.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на уточнение алгоритма расчета пропульсивного коэффициента, показателей мореходности и расширение модели для других типов судов с малой площадью ватерлинии.

Библиографический список использованной литературы

1. Nethercote W.C. A Concept Exploration Model for SWATH Ships / W.C. Nethercote, R.T. Scnmitke // The Naval Architect. — 1982. — Vol. 124, № 5. — P. 113–130.

2. Танцюра А.Г. Математическая модель судна с малой площадью ватерлинии (СМПВ) для оптимизации его характеристик / А.Г. Танцюра // Труды НКИ. — Николаев: Изд. НКИ, 1979. — Вып. 154. — С. 44–53.

3. Spethmann K. A realised SWATH-Application as an Example for Naval Purposes / K. Spethmann // Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. — 2001. — Band 95. — P. 213–221.

4. Кельтон В.Д. Имитационное моделирование. Классика CS. / В.Д. Кельтон, А.М. Лоу [пер. с англ. А. Куленко]. — [3-е изд.]. — СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2004. — 847 с.

5. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский // Пер. с польск. И.Д. Рудинского. — М.: Горячая линия – Телеком, 2006. — 452 с.

Поступила в редакцию 19.04.2013 г.

Бондаренко О.В., Бойко А.П. Особливості вибору оптимальних характеристик суден з малою площею ватерлінії на початковій стадії проектування

Розглядаються особливості вибору оптимальних проектних характеристик суден з малою площею ватерлінії порівняно з традиційними суднами. Наводиться опис математичної моделі і моделі функціонування судна. Обґрунтовано метод оптимізації.

Ключові слова: судно з малою площею ватерлінії, математична модель, обмеження, цільова функція, оптимізація.

Bondarenko A.V., Boyko A.P. Main features of optimal characteristics of Small Waterplane Area Twin Hull Ships selection on the initial stage of design

Main features of optimum design characteristics of Small Waterplane Area Twin Hull Ships selection compared to traditional ships are considered. Description of the mathematical model and model of ship operation is given. Selection of the optimization method is grounded.

Keywords: Small Waterplane Area Twin Hull Ship, mathematical model, restrictions, goal function, optimization.