

РЕШЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОДНОКОРПУСНОГО БЫСТРОХОДНОГО ПАССАЖИРСКОГО СУДНА

Нгуен Гуй Хоанг, асп.

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Приведена методика определения оптимальных главных элементов однокорпусного быстроходного пассажирского судна на начальных стадиях его проектирования, в основу которой положена максимизация эффективности такого типа судна по относительной прибыли от выполнения им совокупности функциональных операций. Получены результаты решения конкретной задачи.

Ключевые слова: решение оптимизационной задачи, главные элементы судна, однокорпусное быстроходное пассажирское судно.

Анотація. Наведено методику визначення оптимальних головних елементів однокорпусного швидкохідного пасажирського судна на початкових стадіях його проектування, в основу якої покладена максимізація ефективності такого типу судна за відносним прибутком від виконання ним сукупності функціональних операцій. Отримано результати розв'язання конкретної задачі.

Ключові слова: розв'язання оптимізаційної задачі, головні елементи судна, однокорпусне швидкохідне пасажирське судно.

Abstract. The method of defining the optimal main elements of monohull high-speed passenger vessel at the initial stages of its design has been performed. This method is based on the efficiency maximization of this type of vessel according to the relative profit of its functional operations performance. The problem solving results are obtained.

Keywords: solution to the optimization problem, main elements of the vessel, monohull high-speed passenger vessel.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Оптимизация играет важную роль в составе проектных обоснований и входит в структуру современных систем автоматизированного проектирования судов. Целью оптимизации является получение оптимального варианта судна по выбранному критерию эффективности из множества возможных вариантов. Для решения задачи оптимизационного проектирования судна необходимо разработать программу оптимизации на основе использования соответствующей методики. В связи с этим данная статья посвящена методике решения оптимизационной задачи определения главных элементов однокорпусного быстроходного пассажирского судна (ОБПС). Это направление является актуальным на сегодняшний день и представляет как научный, так и практический интерес.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Определение главных элементов водоизмещающих однокорпусных быстроходных пассажирских судов выполнено А.О. Канифольским в работе [1]. Однако в этой работе оптимизационная задача выбора основных размерений таких судов не рассматривалась. К последним работам, посвященным методике выбора оптимальных основных характеристик однокорпусных быстроходных пассажирских судов, эксплуатирующихся в переходном режиме или режиме глиссирования, следует отнести работу А.А. Куте-

невой [2]. Вместе с тем в этой работе задача функционирования судов не рассматривалась и критерий оптимальности применялся на основе минимизации стоимости их постройки.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ – разработка методики определения оптимальных главных элементов однокорпусного быстроходного пассажирского судна, эксплуатирующегося в переходном режиме или режиме глиссирования, и получение результатов решения конкретной оптимизационной задачи.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Задачи оптимизации судна решаются на всех стадиях и уровнях проектирования. Как правило, всякая оптимизационная задача должна иметь четко выраженную структуру: определение цели создания оптимизируемого судна, выбор и обоснование подходящего критерия оптимальности, составление системы ограничений решаемой задачи, выбор способа поиска оптимума, разработку алгоритма расчетов и оптимизации, проверку адекватности и чувствительности решения, составление рекомендаций по использованию результатов оптимизации.

В данной статье в качестве критерия оптимальности используется критерий максимума математического ожидания прибыли на показатель эффективности выполнения совокупности основных функциональных операций – одна из форм критерия типа «затраты–эффективность»:

$$\Pi_E = M[\Pi_{ж.ц.}] I_E = M[D_{ж.ц.} - P_{ж.ц.}] I_E \rightarrow \max,$$

где Π_E – показатель эффективности судна; $M[\Pi_{ж.ц.}]$ – операция математического ожидания случайной величины прибыли за жизненный цикл судна; I_E – показатель функциональной эффективности судна; $D_{ж.ц.}$, $P_{ж.ц.}$ – доход и затраты за жизненный цикл судна.

Величина I_E рассчитывается в результате разработки модели функционирования судна, а величины $P_{ж.ц.}$, $D_{ж.ц.}$ и $\Pi_{ж.ц.}$ определяются в модели экономической эффективности.

В модели функционирования судна предполагается, что система N судов с одинаковыми характеристиками (главными размерениями, скоростью, пассажироместимостью и др.) совершает круговые сложные рейсы между M пунктами в районе с заданными гидрометеорологическими условиями (режимные распределения скоростей ветра, высота волн 3%-й обеспеченности и длительность штормов), пассажиропотоком и расстоянием между пунктами. Суда могут совершать последовательные или встречные рейсы по определенным дням или ежедневно [3, 5].

Перед выходом судна в рейс проводится проверка на возможность выполнения рейса по гидрометеорологическим условиям. Если шторма нет, то рейс выполняется. Если шторм есть, то судно ждет улучшения погоды.

Задачи функционирования выполнения основных операций судна (посадка пассажиров на судно, перевозка в пункты и высадка из судна) формулируются с помощью теории марковских процессов и теории массового обслуживания. Для решения этих задач используется метод имитационного моделирования (метод Монте-Карло) [5]. Схема имитационного моделирования элементов рейса судна представлена на рис. 1.

В результате решения задач функционирования судна получается показатель функциональной эффективности I_E , который определяется формулой

$$I_E = P_1 P_2 P_3,$$

где P_1 – вероятность выполнения рейса, которая зависит от погодных условий, столкновения, пожара, посадки на мель, отказа в работе двигателя или движительно-рулевого комплекса и т. д.; P_2 – вероятность обслуживания пассажиропотока, которая определяется в зависимости от интенсивности пассажиропотока, пассажироместимости и режима работы судов; P_3 – вероятность поддержания средней продолжительности полурейса.

В модели экономической эффективности рассчитываются $P_{ж.ц.}$, $D_{ж.ц.}$ и $\Pi_{ж.ц.}$ на основе анализа экономических данных (стоимость 1 т корпуса, 1 т энергетической установки, 1 т электрической установки, 1 т оборудования, 1 т вспомогательных систем, 1 т

топлива, 1 т масла, средняя зарплата судостроителя, средняя зарплата экипажа, нормы расходов на проектирование, утилизацию, ремонт, амортизацию и т. д.) по выражениям

$$\begin{aligned} P_{ж.ц.} &= C_{пр} + C_{п} + C_{эк} + C_y + C_{кр}; \\ D_{ж.ц.} &= C_{проез} N_{пасс} Z_{рейс} N_{рейс}; \\ \Pi_{ж.ц.} &= D_{ж.ц.} - P_{ж.ц.} \end{aligned}$$

где $C_{пр}$ – стоимость проектирования судна; $C_{п}$ – стоимость постройки судна; $C_{эк}$ – эксплуатационные расходы судна за жизненный период; C_y – затраты на утилизацию судна; $C_{кр}$ – ставки по кредитам, выдаваемые банком (если предлагается брать в банке кредиты на приобретение судна); $C_{проез}$ – стоимость проезда, долл./чел.миль; $N_{пасс}$ – среднее количество перевезенных пассажиров за рейс, чел.; $Z_{рейс}$ – протяженность рейса, миль; $N_{рейс}$ – число выполненных рейсов судами в течение жизненного цикла.

После разработки модели функционирования и модели экономической эффективности разрабатывается модель инженерных и мореходных качеств судна, в которой приводятся следующие расчеты: мощности энергетической установки, вместимости, нагрузки масс, центра тяжести и величины судна, а также остойчивости, непотопляемости, комфортности и прочности. Полученные в результате этих расчетов выражения связи используются в качестве математической модели, а также ограничений в алгоритмах оптимизации судна.

На основе полученных зависимостей функционирования, эффективности и качеств оптимизационная задача может быть сформулирована следующим образом: найти максимум целевой функции

$$F(X, U) = \Pi_E \rightarrow \max$$

при одновременном выполнении тривиальных и функциональных ограничений:

$$\begin{aligned} (x_i)_{\min} &\leq x_i \leq (x_i)_{\max} \quad (i = 1, \dots, n); \\ G_j(X, U) &\geq A_j \quad (j = 1, \dots, m), \end{aligned}$$

где $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор независимых переменных; $U(u_1, u_2, \dots, u_m)$ – вектор параметров задания на проектирование судна; n, m – количество независимых переменных и ограничений оптимизационной задачи; $(x_i)_{\min}, (x_i)_{\max}$ – соответственно нижняя и верхняя допустимая граница изменения i -й независимой переменной; A_j – нормы или уровни допустимых значений характеристики j -го качества судна.

В данной статье принимаются: $x_1 = L$ – длина судна; $x_2 = B$ – ширина судна; $x_3 = H$ – высота борта; $x_4 = T$ – осадка; $x_5 = C_b$ – коэффициент общей полноты; $x_6 = v$ – скорость судна; значения $(x_i)_{\min}, (x_i)_{\max}$ определяются по табл. 1.

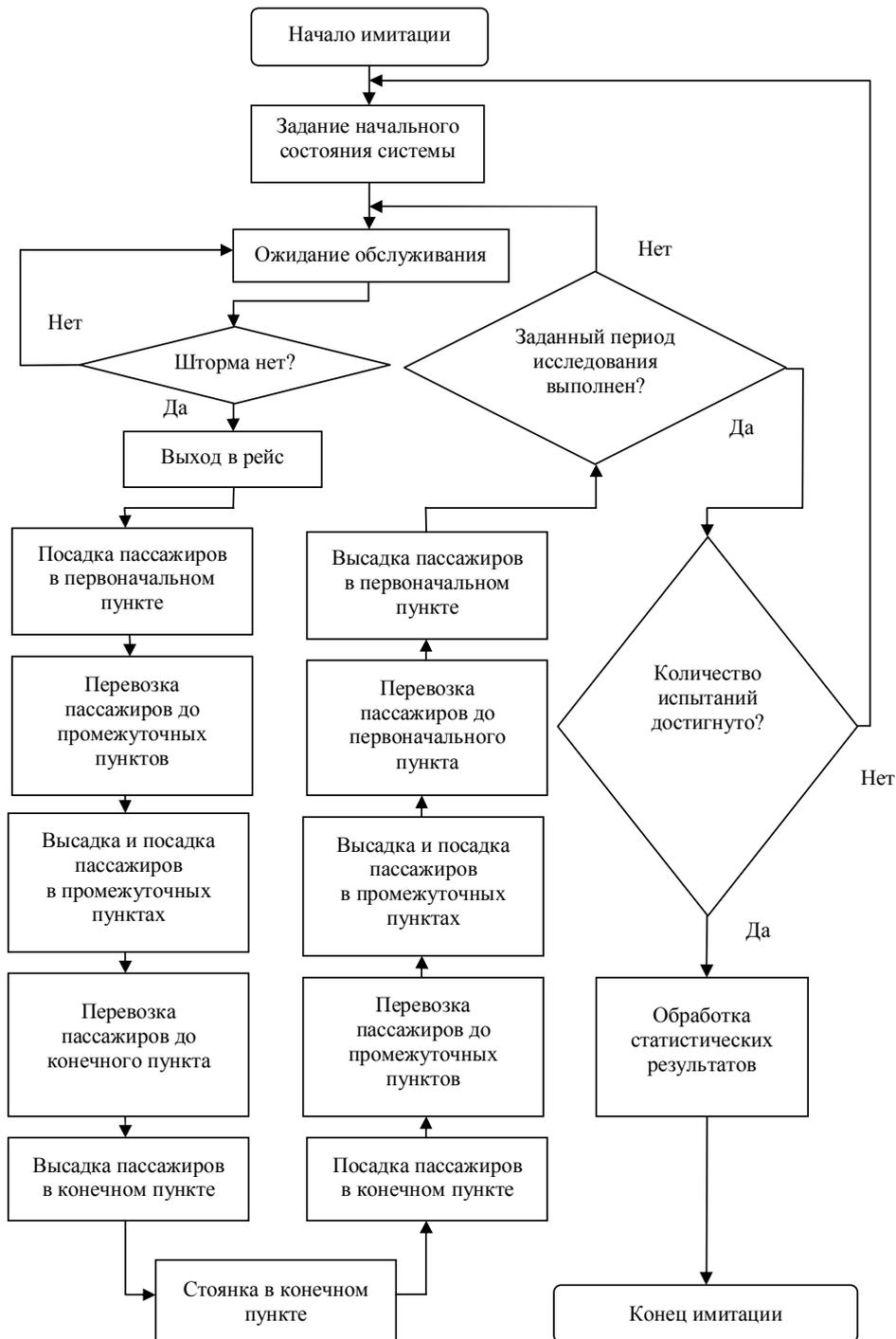


Рис. 1. Схема имитационного моделирования элементов рейса судна

Таблица 1. Допустимые значения независимых переменных

Независимая переменная	Обозначение		Граница	
			нижняя ($x_{i,\min}$)	верхняя ($x_{i,\max}$)
Длина судна, м	L	x_1	17,00	50,00
Ширина судна, м	B	x_2	4,00	9,00
Высота борта, м	H	x_3	1,70	4,00
Осадка судна, м	T	x_4	0,70	2,20
Коэффициент общей полноты	C_b	x_5	0,35	0,55
Скорость судна, уз	v	x_6	24,00	40,00

Система функциональных ограничений в оптимизационной задаче проектирования ОБПС, выражающих следующие требования:

– **к эффективности эксплуатации:**

по ходкости:

$$N_{\phi} \geq N_e,$$

где N_{ϕ} – фактическая мощность главного двигателя; N_e – необходимая мощность главного двигателя, кВт; по плавучести судна:

$$\varepsilon_1 = \left| \frac{\Delta - \sum P_i}{\Delta} \right| \leq 0,01; \Delta = k_{\text{выс}} \rho C_b L B T,$$

где Δ – водоизмещение судна, т; $k_{\text{выс}}$ – коэффициент, который учитывает выступающие части корпуса судна; $\rho = 1,025 \text{ т/м}^3$ – удельная масса воды; P_i – составляющие массы судна;

по вместимости:

$$\varepsilon_2 = \left| \frac{S_n - S_n^*}{S_n} \right| \leq 0,01; S_n^* = \sum S_{ni},$$

где S_n – необходимая суммарная площадь палуб; S_n^* – располагаемая суммарная площадь палуб; S_{ni} – располагаемая площадь i -го помещения на палубе;

– **к безопасности эксплуатации:**

по критерию погоды:

$$K_{\text{погод}} = b/a \geq 1,$$

где $K_{\text{погод}}$ – коэффициент критерия погоды; a , b – площади, которые определяются по [7];

по параметрам диаграммы статической устойчивости (ДСО) [7]:

$$\theta_{\text{max}} \geq 15^\circ; l_{\text{ст}30} \geq 0,2 \text{ м};$$

$$S_{30^\circ-40^\circ} \geq 0,03 \text{ м} \cdot \text{рад};$$

$$S_{\theta_{\text{max}}} \geq [S_{\theta_{\text{max}}}],$$

где

$$[S_{\theta_{\text{max}}}] = \begin{cases} 0,055 \text{ м} \cdot \text{рад} & \text{при } \theta_{\text{max}} \geq 30^\circ; \\ 0,055 + 0,001(30 - \theta_{\text{max}}) \text{ м} \cdot \text{рад} & \text{при } \theta_{\text{max}} < 30^\circ; \end{cases}$$

θ_{max} – угол крена соответственно максимальному плечу диаграммы статической устойчивости, град; $l_{\text{ст}30}$ – плечо ДСО при угле крена 30° ; $S_{\theta_{\text{max}}}$ – площадь диаграммы, ограниченная кривой восстанавливающих плеч до угла θ_{max} , м·рад; $S_{30^\circ-40^\circ}$ – площадь ДСО, ограниченная кривой восстанавливающих плеч между $\theta = 30^\circ$ и $\theta = 40^\circ$, м·рад;

по метацентрической высоте:

$$h_{\text{semi}} \geq 0,15,$$

где h_{semi} – метацентрическая высота судна в неводоизмещающем режиме, м (определяется в работе [4]);

по углу крена на тихой воде от перемещения пассажиров в неводоизмещающем режиме $\theta_{\text{пасс}}$, град:

$$\theta_{\text{пасс}} = \frac{0,25 P_{\text{пасс}} B_{\text{п}}}{\Delta h_{\text{semi}}} \leq 10^\circ,$$

где $P_{\text{пасс}}$ – суммарная масса пассажиров, т; $B_{\text{п}}$ – ширина палубы, м;

по углу крена на тихой воде от действия давления бокового ветра в неводоизмещающем режиме $\theta_{\text{в}}$, град:

$$\theta_{\text{в}} = \frac{P_{\text{в}} A_{\text{в}} z_{\text{в}}}{\Delta h_{\text{semi}}} \leq 10^\circ,$$

где $P_{\text{в}} = 500(v_w/26)^2$ – давление постоянного ветра, Па; v_w – скорость ветра, м/с, соответствующая наилучшим предполагаемым условиям; $A_{\text{в}}$ – площадь парусности при скорости судна v , м²; $z_{\text{в}}$ – плечо парусности, м, которое принимается равным измеренному по вертикали расстоянию от центра парусности до центра площади проекции подводной части корпуса на диаметрально плоскость;

по углу крена на установившейся циркуляции в неводоизмещающем режиме во всех условиях нагрузки:

$$\theta_{\text{ц}} \leq 8^\circ;$$

по общему углу крена от действия давления бокового ветра и от циркуляции в неводоизмещающем режиме:

$$\theta_{\text{в}} + \theta_{\text{ц}} \leq 12^\circ;$$

по непотопляемости:

$$H - T \geq F_{\text{min}},$$

где F_{min} – допустимая высота надводного борта судна, м;

по прочности:

$$\sigma_{\text{max}} \leq [\sigma],$$

где σ_{max} – максимальное нормальное напряжение в миделе корпуса, МПа; $[\sigma]$ – допускаемое нормальное напряжение, МПа;

– **к комфортности судна:**

по вертикальным ускорениям:

$$a_{\text{cg}}^n \leq 0,05g,$$

где a_{cg}^n – вертикальные ускорения, действующие на пассажиров, м/с²; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

по величине MSI (*Motion Sickness Incidence*), %, определяющейся по критерию *O'Halon* и *McCauley* [8]:

$$MSI \leq 10 \%;$$

по плавности бортовой качки судна:

$$T_{\theta} \geq 6 \text{ с},$$

где T_{θ} – собственный период качки судна, с.

Поскольку поставленная оптимизационная задача представляется нелинейными алгебраическими и трансцендентными зависимостями, то для ее решения используются методы нелинейного программирования. Для поиска оптимальных значений искомой

целевой функции используется метод Пауэлла с применением метода внешних штрафных функций [6].

Алгоритм решения поставленной оптимизационной задачи показан на рис. 2. В этом алгоритме входные данные включают:

технические и экономические: каталог двигателей, нормативы затрат, цена билета и т. д.;

задание на проектирование: характеристики района плавания, погодные условия, расстояние между пунктами, пассажиропоток, экипаж, тип и количество двигателей, материал корпуса и надстройки, режим работы су-

дов, количество палуб, вариант размещения пассажиров (на палубах или на втором дне и палубах) и т. д.

На основе созданного алгоритма разработан комплекс программ «Optimization Main Elements of High Speed Passenger Ship – OMEHSPS», предназначенный для нахождения оптимальных элементов судна. С помощью этой программы проверяются адекватность и чувствительность разработанной модели, оценивается максимальная погрешность вычислений и выполняется серия расчетов. В примере таких расчетов рассматривалась линия: Одесса – Очаков – Херсон (рис. 3).

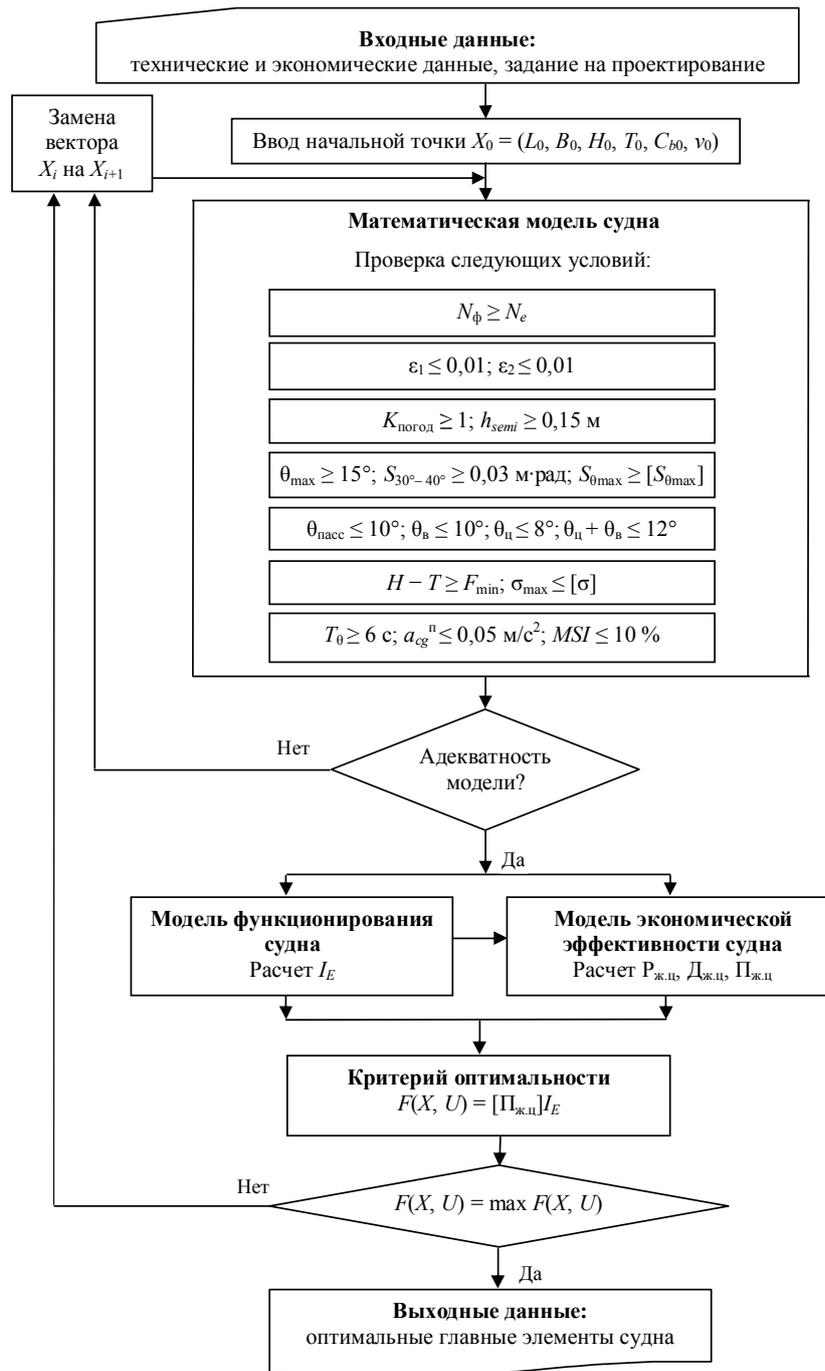


Рис. 2. Общая блок-схема алгоритма определения оптимальных главных элементов судна

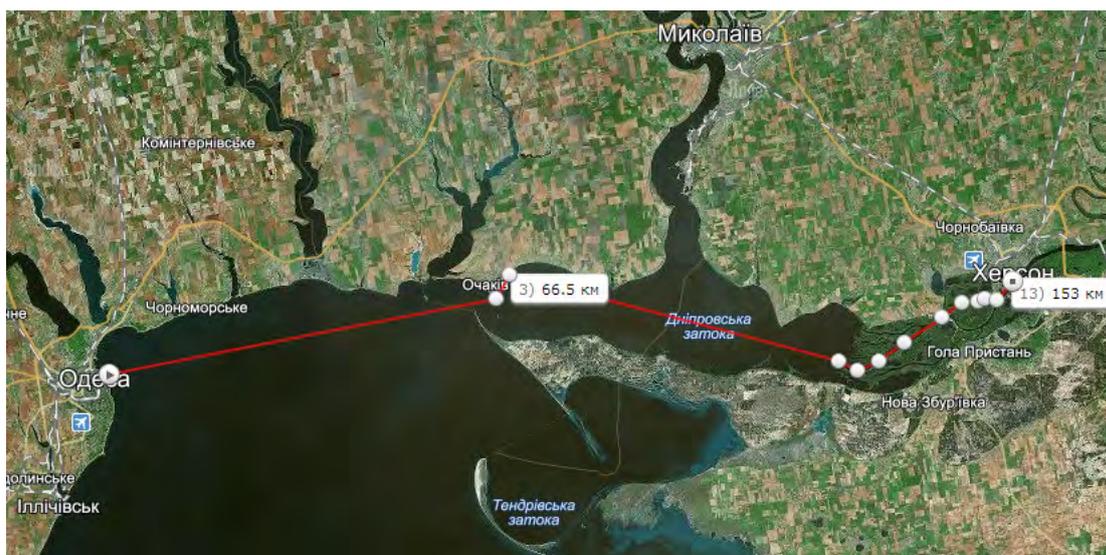


Рис. 3. Линия эксплуатации судов

На этой линии два судна с одним ярусом совершают встречные рейсы в течение жизненного цикла 15 лет. Полученный оптимальный вариант судна

представлен в табл. 2. Время перевозки пассажиров и цена билета на эти суда и на автобусы указаны в табл. 3.

Таблица 2. Результаты решения оптимизационной задачи

Наименование	Обозначение	Оптимальный вариант	Близкий проект из существующих
Длина судна, м	L	18,95	17,27
Ширина судна, м	B	4,15	4,48
Высота борта, м	H	1,78	2,05
Осадка судна, м	T	0,81	0,75
Коэффициент общей полноты	C_b	0,418	–
Скорость судна, уз	v_k	24,5	25,0
Число ярусов	$N_{\text{палуб}}$	1	1
Пассажироместимость, чел.	$N_{\text{пасс}}$	64	49
Цена билета, долл./чел.миль	Π_0	0,1	–
Средняя продолжительность полурейса, ч	$0,5t_{\text{рейс}}$	3,6	–
Показатель функциональной эффективности	I_E	0,712	–
Целевая функция, млн долл.	Π_E	23,662	–
Количество судов для обеспечения пассажиропотока	N_{ship}	2	–

Таблица 3. Время перевозки пассажиров и цена билета

Вид транспорта	Одесса – Очаков		Очаков – Херсон		Одесса – Херсон	
	t , ч	Ц, грн	t , ч	Ц, грн	t , ч	Ц, грн
Автобус	3,0	55	3,1	60	4,5	80
Судно	1,5	29	2,1	37	3,6	65

Из полученных результатов следует, что эксплуатация таких судов на линии Одесса – Очаков – Херсон экономически выгоднее автобусов.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика определения оптимальных главных элементов однокорпусного быстроходного пассажирского судна и приведены результаты решения оптимизационного проектирования судна,

эксплуатирующегося на линии Одесса – Очаков – Херсон.

2. Предложенная методика и комплекс программ OMEHSPS позволяют проектантам и судноходным компаниям транспортных пассажирских перевозок определять оптимальные главные элементы и скорость ОБПС на начальных стадиях проектирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Канифольский, А. О.** Определение главных размерений быстроходных однокорпусных водоизмещающих судов на начальных стадиях проектирования [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Канифольский А. О. – О. : ОНМУ, 2003.
- [2] **Кутенева, А. А.** Разработка методики проектного оптимизационного анализа скоростных пассажирских судов и катеров [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Кутенева А. А.– СПб., 2002.
- [3] **Нгуен, Г. Х.** Модель функционирования быстроходных пассажирских судов, работающих с круговыми сложными рейсами [Текст] / Г. Х. Нгуен // Матеріали ІІІ Міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2012.
- [4] **Нгуен, Г. Х.** Определение характеристик начальной поперечной остойчивости однокорпусных быстроходных судов, эксплуатирующихся в переходном режиме [Текст] / Г. Х. Нгуен // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2013. – № 2. – С. 29–31.
- [5] **Нгуен, Г. Х.** Решение задачи функционирования быстроходных пассажирских судов методом имитационного моделирования [Текст] / Г. Х. Нгуен // Проблеми техніки : наук.-вироб. журн. – О., 2013. – № 2. – С. 146–155.
- [6] **Некрасов, В. А.** Определение оптимальных характеристик быстроходного пассажирского судна [Электронный ресурс] / В. А. Некрасов, Г. Х. Нгуен // Вісник НУК. – Миколаїв : НУК, 2012. – № 2. – Режим доступу: <http://www.ev.nuos.edu.ua>.
- [7] Правила классификации и постройки высокоскоростных судов Российского Морского Регистра Судоходства [Текст]. – СПб., 2008.
- [8] **O'Halon, J. P.** Motion Sickness Indence as a Funtion of Frequency and Accelaration of Vertical Sinusoidal Motion [Text] / J. P. O'Halon // Aerospace Medicine. – 1974. – № 45(4). – P. 366–369.

© Нгуен Гуй Хоанг

Надійшла до редколегії 13.05.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. В. О. Некрасов

Статтю розміщено у Віснику НУК № 3, 2013