

УДК 629.12

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРУЗОВОГО СУДНА СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕНИЙ СУДОВОГО ХОДА

Сундеев Игорь Олегович¹, аспирант

e-mail: igorsundeyev152@gmail.com

Кочнев Юрий Александрович¹, доктор технических наук

e-mail: tmnnkoch@mail.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Рассмотрена математическая модель сухогрузного судна смешанного плавания, учитывающая случайные эксплуатационные факторы, главным из которых является переменная глубина судового хода. Особенностью модели является объединение подбора главных размерений, характеристик гребного винта и главного двигателя в единый итерационный цикл. Верификация выполнена на трёх судах-прототипах различных классов Российского Классификационного Общества: «Сибирский» (М), «Русич» (М-СП) и «Святой Георгий» (М-ПР). Приведены результаты численного анализа влияния глубины судового хода на главные размерения и потребную мощность главного двигателя.

Ключевые слова: сухогрузное судно, исследовательское проектирование, главные размерения, мелководье.

FEATURES OF THE MATHEMATICAL MODEL OF A MIXED-NAVIGATION CARGO VESSEL TAKING INTO ACCOUNT RANDOM OPERATIONAL FACTORS

Igor O. Sundeev¹, Doctoral Student

e-mail: igorsundeyev152@gmail.com

Yuri A. Kochnev¹, Doctor of Technical Sciences

e-mail: tmnnkoch@mail.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. A mathematical model of a mixed-navigation dry cargo vessel adapted to random operational factors is presented; the variable fairway depth is identified as the dominant factor. The model integrates the selection of principal dimensions, propeller and main engine into a single iterative loop, so that the response to depth variation propagates through all subsystems simultaneously. Verification on three prototype vessels of different RCO classes — «Sibirsky» (M), «Rusich» (M-SP) and «Saint George» (M-PR) — and numerical results on the influence of fairway depth are presented.

Keywords: dry cargo vessel, research design, principal dimensions matching, shallow water.

Введение

На начальной стадии проектирования от модели требуются минимальный объём исходных данных и высокая чувствительность к варьируемым параметрам. Задача формулируется в виде системы

$$F_i = f_i(A_1, A_2, A_3, A_4), \quad (1)$$

где A_1 — внешние данные (линия эксплуатации, требования Регистра, характеристики груза),

A_2 — искомые элементы судна;

A_3 — связи между ними;

A_4 — мореходные и технико-эксплуатационные свойства (плавучесть, вместимость, остойчивость, ходкость и тд.).

В работах [1,3,6,7] система (1) рассматривается при детерминированных условиях. Для судов внутреннего и смешанного плавания доминирующим случайным фактором является глубина судового хода, ограничивающая допустимую осадку и определяющая главные размерения судна [2].

Математическая модель грузового судна

Вектор искомых элементов A_2 в предложенной модели разделён на два уровня. Вектор искомых параметров включает независимо варьируемые величины L , B , δ и зависимые характеристики: T , H , D , параметры гребного винта ($D_v, P/D, n$) и мощность главного двигателя $N_{ГД}$, подбираемую из каталога серийных СЭУ.

Математический вектор A_2 имеет вид системы уравнений:

$$\begin{cases} D = \rho L B T \delta, \\ P_{гр} \mu = \lambda_{тр} L B (H - h_{ком}) \varphi_{тр} \delta, \\ D = P_{корп} + P_{мех} + P_{обор} + P_{зап} + P_{гр}, \\ N_{ГД} = P_E / \eta_{пр}, \quad P_E = R(L, B, T, \delta, v, H_{гл}) \cdot v, \end{cases} \quad (2)$$

где μ — удельный погрузочный объём;

$\lambda_{тр}$, $\varphi_{тр}$ — относительная длина трюма и коэффициент использования его объёма;

$h_{ком}$ — высота комингса;

$\eta_{пр}$ — пропульсивный коэффициент;

R — полное сопротивление движению;

$H_{гл}$ — глубина судового хода.

Расчёт массы металлического корпуса в модели основан на модифицированных измерителях А.Г. Егорова [3], пересчитанных на классы внутреннего и смешанного плавания; масса оборудования, судовых устройств и систем находится по методу модулей. Существенным отличием системы (2) от детерминированных постановок является то, что глубина $H_{гл}$ входит в неё в явном виде и трактуется далее, как случайная величина с известным распределением на маршруте.

Поправка сопротивления на ограниченную глубину вводится по дополненному методу Холтропа–Меннена [4] с учётом особенностей, рассмотренных в работах [2, 5]:

$$R = R_{гл} (1 + C_{ш}), \quad C_{ш} = 14,83 (T/H_{гл})^{2,5} [1 + 2,5 (Fr_h - 0,7)]_+, \quad (3)$$



где $Fr_h = v/\sqrt{g H_{гл}}$ — число Фруда по глубине; $[\cdot]_+$ означает, что скобка учитывается только при $Fr_h > 0,7$; величина $C_{ш}$ сверху ограничена значением 0,30.

Случайная природа глубины проявляется в том, что, например, $H_{гл}$ изменяется по длине маршрута. Следствием является ограничение фактической допустимой осадки

$$T_{доп} = \min(H_{гл, \min} - \Delta H_{зап}, T_{\max}), \quad (4)$$

где $\Delta H_{зап} \approx 0,3$ м — навигационный запас под килем.

Уменьшение $T_{доп}$ вызывает рост произведения $L \cdot B \cdot \delta$ смоченной поверхности и буксировочной мощности — эта обратная связь закладывается в итерационный цикл модели.

Главные размерения, гребной винт и главный двигатель согласуются в едином итерационном цикле (рис. 1). Контролируются две относительные невязки: по упору гребного винта и по мощности главного двигателя:

$$\delta_P = \frac{|P_{факт} - P_{треб}|}{P_{треб}}, \quad \delta_N = \frac{|N_{факт} - N_{треб}|}{N_{треб}}. \quad (5,6)$$

Гребной винт подбирается по полиномиальной аппроксимации Вагенингенской В-серии:

$$K_T(\lambda_e, H/D, \theta, Z) = \sum C_{stuv} J^s (H/D)^t \theta^u Z^v, \quad (7)$$

где λ_e — коэффициент поступи;

H/D — отношение геометрического шага винта к его диаметру;

θ — дисковое отношение;

Z — число лопастей;

K_T — коэффициент упора винта;

C_{stuv} — коэффициенты Вагенингенской В-серии;

s, t, u, v — показатели степеней. Аналогично для K_Q .

Пропульсивный коэффициент выражается через КПД изолированного винта и коэффициенты взаимодействия с корпусом:

$$\eta_{пр} = \eta_0 \frac{1 - t}{1 - w} \eta_{отн}, \quad (8)$$

где w и t — коэффициенты попутного потока и засасывания принимаем по зависимостям метода Холтропа–Меннена [4];

$\eta_{отн}$ — относительный КПД, условно принятый в работе равным 0,98.

Коэффициент запаса мощности $k_{ЗАП}$ учитывает обрастание, ледовый класс, волнение, манёвры и переход к MCR [9]; представлен мультипликативно:

$$k_{ЗАП} = k_{эсп} \cdot k_{лед} \cdot k_{мор} \cdot k_{рез} \cdot k_{MCR}, \quad (9)$$

В расчётах принято $k_{ЗАП} \approx 1,81$; мультипликативная форма позволяет менять отдельные множители при смене класса судна.

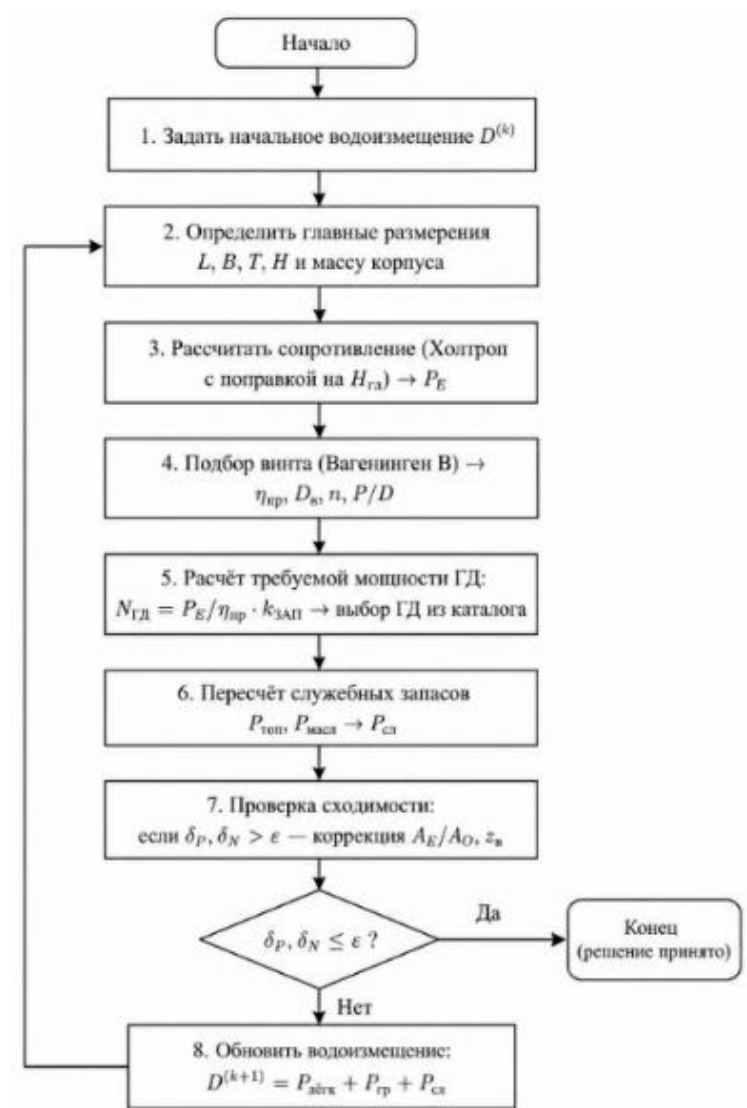


Рисунок 1 – Блок-схема итерационного цикла согласования

Результаты

По модели разработана программа на Python; её верификация выполнена на трёх судах-прототипах. Относительное отклонение:

$$\Delta = (X_{\text{мод}} - X_{\text{прот}}) / X_{\text{прот}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

Таблица 1. Сравнение результатов расчёта с прототипами

Характеристика	«Сибирский» (пр. 292)			«Русич» (пр. 00101)			«Св. Георгий» (М-ПР)		
	Прот.	Мод.	$\Delta, \%$	Прот.	Мод.	$\Delta, \%$	Прот.	Мод.	$\Delta, \%$
$L, \text{ м}$	114,0	116,07	+1,8	128,2	130,66	+1,9	147,0	137,99	-6,1
$B, \text{ м}$	13,20	13,49	+2,2	16,50	16,75	+1,5	17,50	17,20	-1,7
$T, \text{ м}$	3,60	3,55	-1,4	4,20	3,99	-5,0	5,80	5,66	-2,4
$H, \text{ м}$	5,50	6,03	+9,6	6,00	6,77	+12,8	8,30	8,42	+1,4
δ	0,80	0,82	+2,5	0,78	0,82	+5,1	0,78	0,82	+5,1
$D, \text{ т}$	4400	4836	+9,9	7250	7338	+1,2	10 500	11 294	+7,6
$DWT, \text{ т}$	3020	3000	-0,7	5500	4837	-12,1	7650	6791	-11,2
$N_{\text{ГД}}, \text{ кВт}$	1100	1680	+52,7	2160	2555	+18,3	2640	1739	+34,1

По геометрическим характеристикам корпуса отклонения для всех трёх прототипов находятся в пределах $\pm 7\%$, что соответствует точности начальной стадии проектирования. Водоизмещение прогнозируется со средним отклонением $+6,2\%$. Систематическое превышение расчётной N обусловлено тем, что в модели N выбирается как максимум из условий N/T и вместимости трюма при $\lambda_{тр} = 0,7$.

Наибольшие расхождения наблюдаются по мощности главного двигателя. Это связано с дискретностью ряда серийных СЭУ.

Влияние глубины судового хода рассмотрено для двух расчётных сценариев. В первом корпус зафиксирован (принят проектный вариант «Святого Георгия»: $L = 137,99$ м, $B = 17,20$ м, $T = 5,66$ м, $\delta = 0,82$, $v = 20$ км/ч), варьируется только глубина. Во втором для каждого значения $H_{гл}$ выполняется полный перерасчет судна при фиксированной грузоподъёмности $P_{гр} = 6500$ т.

Таблица 2. Влияние глубины судового хода на характеристики судна

	Сценарий 1			Сценарий 2					
$H_{гл}$, м	Fr_h	ΔN , %	$T_{доп}$, м	L , м	B , м	H , м	B/T	ΔN , %	
8,00	0,63	+1,0	5,80	136,3	17,0	8,60	2,93	0,0	
6,00	0,72	+2,2	5,70	137,5	17,1	8,47	3,01	+2,2	
5,00	0,79	+3,7	4,70	151,9	18,9	7,13	4,03	+8,0	
4,00	0,89	+7,1	3,70	172,6	21,5	5,74	5,81	+30,1	
3,50	0,95	+7,8	3,20	186,6	23,3	5,06	7,27	+61,5	
3,00	1,02	+7,8	2,70	205,0	25,6	4,36	9,46	+181,7	

Для наглядного анализа влияния глубины судового хода на главные размерения судна результаты сценария 2 представлены графически на Рисунке 2:

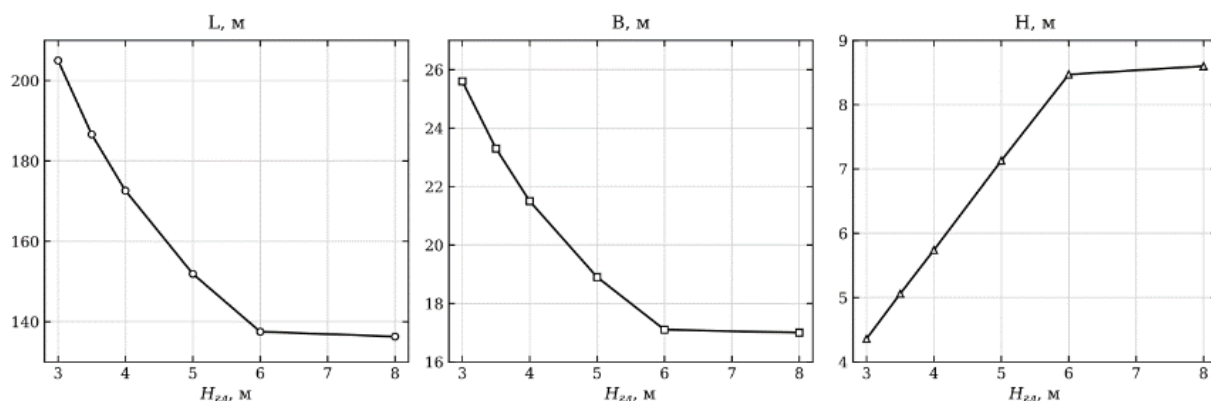


Рисунок 2 – Зависимость главных размерений судна от глубины судового хода

При неизменном корпусе (сценарий 1) снижение глубины вызывает ограниченный рост мощности на $7,8\%$, вследствие насыщения поправки на мелководье. В сценарии 2 результат принципиально иной: снижение $T_{доп}$ приводит к увеличению размерений и их соотношений, выходя за пределы «разумных» для судов на внутренних водных путях, а мощность главного двигателя — в 2,82 раза.

В последовательных моделях [1, 6] эффект перераспределения масс и сопротивления при изменении глубины остаётся скрытым. Единый итерационный цикл обнаруживает истинный масштаб явления и позволяет согласовать осадку с обеспеченностью глубин на маршруте.

Заключение

Разработанная модель отличается от традиционных постановок объединением расчёта корпуса, винта и главного двигателя в единый итерационный цикл, а также явным учётом глубины судового хода как случайного эксплуатационного фактора.

Проверка на трёх судах-прототипах показала погрешность $\leq 7\%$ по размерениям и $\approx 6\%$ по водоизмещению. Это позволяет применять модель для проектирования судов на несколько эксплуатационных осадок в течение навигации или рейса.

Список литературы:

1. Гайкович А. И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов: в 2 т. Т. 1. Описание системы «Корабль». — СПб.: НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. — 819 с.
2. Платов А. Ю., Васильева О. Ю. Анализ применимости методов расчёта коэффициента остаточного сопротивления для судов внутреннего плавания при эксплуатационно-экономическом обосновании новых судов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2019. — Вып. 60. — С. 193–202.
3. Егоров А. Г. Определение весовой нагрузки судов смешанного «река-море» плавания нового поколения в начальной стадии проектирования // Морской вестник. — 2013. — № 4(48). — С. 19–22.
4. Holtrop J., Mennen G. G. J. A statistical power prediction method // International Shipbuilding Progress. — 1978. — Vol. 25, No. 290. — P. 166–170.
5. Басин А. М. Ходкость и управляемость судов: учебное пособие для вузов водного транспорта. — М.: Транспорт, 1977. — 456 с.
6. Ашик В. В. Проектирование судов: учебник. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Судостроение, 1985. — 320 с.
7. Пашин В. М. Оптимизация судов. — Л.: Судостроение, 1983. — 296 с.
8. Российское классификационное общество. Правила классификации и постройки судов внутреннего и смешанного (река–море) плавания: в 5 т. Т. 1. Корпус и оборудование. — М.: РКО, 2023. — 285 с.
9. ISO 15016:2015. Ships and marine technology — Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data. — Geneva: International Organization for Standardization, 2015. — 74 p.

