

УДК 629.12

Ю.А. Кочнев

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТАНКЕРА НА РАННЕЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

### ФГОУ ВПО «ВГАВТ»

Рассматривается вопрос оптимизации главных размерений танкера смешанного (река-море) плавания на начальном этапе проектирования. Приведена математическая модель их расчёта. Получены графические зависимости для оценки влияния главных элементов танкера на показатель эффективности, по результатам численного машинного эксперимента.

*Ключевые слова:* танкер, главные элементы, математическая модель, критерий оптимальности.

На начальном этапе проектирования одной из важнейших задач является определение главных элементов (ГЭ) судна. От того, насколько обоснованно они будут рассчитаны, зависит качество спроектированного транспортного объекта. К таким элементам, прежде всего, относят длину судна  $L$ , ширину  $B$ , высоту борта  $H$ , осадку  $T$ , коэффициент общей полноты  $\delta$ . Все остальные элементы и характеристики определяются по ним на последующих шагах проектирования.

Рассматриваемая задача в общем виде может быть сформулирована следующим образом. По известным исходным данным, составляющим вектор  $\mathbf{X}$ , определить такие элементы танкера  $X_1$ , чтобы функция цели (критерий оптимальности) достигал экстремума.

$$k_{\text{opt}} = f_1(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) \rightarrow \min(\max), \quad (1)$$

где  $\mathbf{X}_2$  – вектор нормативных величин.

При этом должны выполняться ограничения, определяемые требованиями заказчика, условиями эксплуатации, правилами надзорного общества и различных международных конвенций, которые в общем виде могут быть в виде строгих равенств или неравенств.

$$\begin{aligned} q_s(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) &= 0, & s \in S_1, \\ q_s(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) &> 0, & s \in S_2. \end{aligned} \quad (2)$$

К строгим равенствам ( $S_1$ ) относятся, например:

– уравнение плавучести

$$D(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) - \rho g V(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) = 0, \quad (3)$$

где  $D$  – вес судна;  $\rho$  – плотность воды;  $V$  – водоизмещение судна;

– уравнение ходкости

$$Pe(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) - R(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) = 0, \quad (4)$$

где  $Pe$  – упор, развиваемый двигателем;  $R$  – сопротивление воды движению судна.

Примерами ограничения типа неравенств ( $S_2$ ) являются:

– условие обеспечения остойчивости

$$h_0(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) - h_{\min} > 0, \quad (5)$$

где  $h_0$  – малая метацентрическая высота;  $h_{\min}$  – минимально допустимое значение начальной метацентрической высоты;

– условие обеспечения грузовместимости

$$W(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) - \rho_{\text{гр}} P_{\text{гр}} > 0, \quad (6)$$

где  $W$  – суммарная вместимость грузовых танков.

Критерием оптимизации может быть доход, минимальная фрахтовая ставка, приведённые затраты от эксплуатации судна и т.п.

Исходными данными при решении задачи являются: грузоподъёмность судна  $P$ , характеристики перевозимого груза (плотность  $\rho_{гр}$ , температура вспышки паров), мощность  $N$  или скорость  $v$ , характеристики линии эксплуатации (общая протяжённость линии, протяжённость речного и морского участка, габариты судового хода), класс регистра, особенности конструкции корпуса (шпации, высота второго дна, количество ярусов надстройки), данные для экономического расчёта.

Варьируемыми элементами являются главные размерения или их соотношения, а также ряд характеристик АКТ танкера, таких как две осадки, носовое или кормовое расположение надстройки, параметры комбинированного судна. В зависимости от принятых варьируемых параметров можно решать различные задачи, приведённые в табл. 1.

Таблица 1

## Варианты оптимизируемых параметров

№ задачи	Варьируемые параметры	Искомые величины
1	$\delta, L, B$	$D, T, H$
2	$\delta, l = L/B, t = T/B$	$D, L, B, T, H$
3	$\delta, L, t = T/B$	$D, B, T, H$
4	$\delta, L, B, T$	$D, P_{\max}$
5	$W_{\text{контейнеров}}/W_{\text{нефтегруза}}$	$D, P_{\text{контейнеров}}, P$
6	$T_M/T_P$	$P_{\max}, D$
7	Расположение надстройки	$L, H$

Укрупнённая блок-схема оптимизации танкера смешанного (река-море) плавания приведена на рис. 1.

Водоизмещение судна в первом приближение (блок 4) определяется по коэффициенту утилизации. Главные размерения, если они не заданы, по их соотношениям. Высота борта – с учётом требований грузоместимости и минимальной высоты надводного борта.

Полученные главные размерения судна должны удовлетворять ограничениям, приведённым в табл. 2, в границах которых математическая модель адекватно описывает танкер смешанного (река-море) плавания. К ним относятся ограничения, обусловленные диапазоном действия расчётных методик, ограничения налагаемые Правилами Российского Речного Регистра [3] и Правилами Российского Морского Регистра Судоходства [4].

Таблица 2

## Ограничения функционирования математической модели танкера

Класс регистра	Ограничение			Параметры формы корпуса
	$L$ , не более	$L/H$ , не более	$B/H$ , не более	
М – СП, М – Пр, О – Пр	140	24,0	4,0	$30 \leq (L/B)^2 \leq 100$ , $3,6 \leq B/T \leq 7,53$ $0,73 \leq \delta \leq 0,93$
R2 – RSN	150	21,0	3,0	

Кроме этого, на модель накладываются ограничения, указанные пользователем, связанные с условиями эксплуатации проектируемого судна: габариты судового хода на линии эксплуатации, диапазон изменения варьируемых параметров.

По полученным главным размерениям в блоке 6 интерполяционным методом генерируется теоретический корпус. Следует отметить, что при высоких значениях коэффициента общей полноты ( $\delta > 0,9$ ) носовая оконечность судна принимает бульбовую форму, что существенно сказывается на ряде характеристик, а, следовательно, и на эффективности танкера.

В блоке 7 производится расчёт водоизмещения танкера, которое определяется суммой масс отдельных разделов, статей, групп, подгрупп нагрузки масс. Методика их определения приведена в [2], где масса металлического корпуса рассчитывается с учётом фактических размеров и плотности материала, а остальные массы – по статистическим зависимостям. Для определения размеров элементов корпуса проектируется «виртуальный» мидель-шпангоут в соответствии с требованиями Правил [3, 4] и проверяется общая прочность корпуса судна по допускаемым напряжениям. Такой подход позволяет учесть особенности конструкции танкера и условия его эксплуатации.

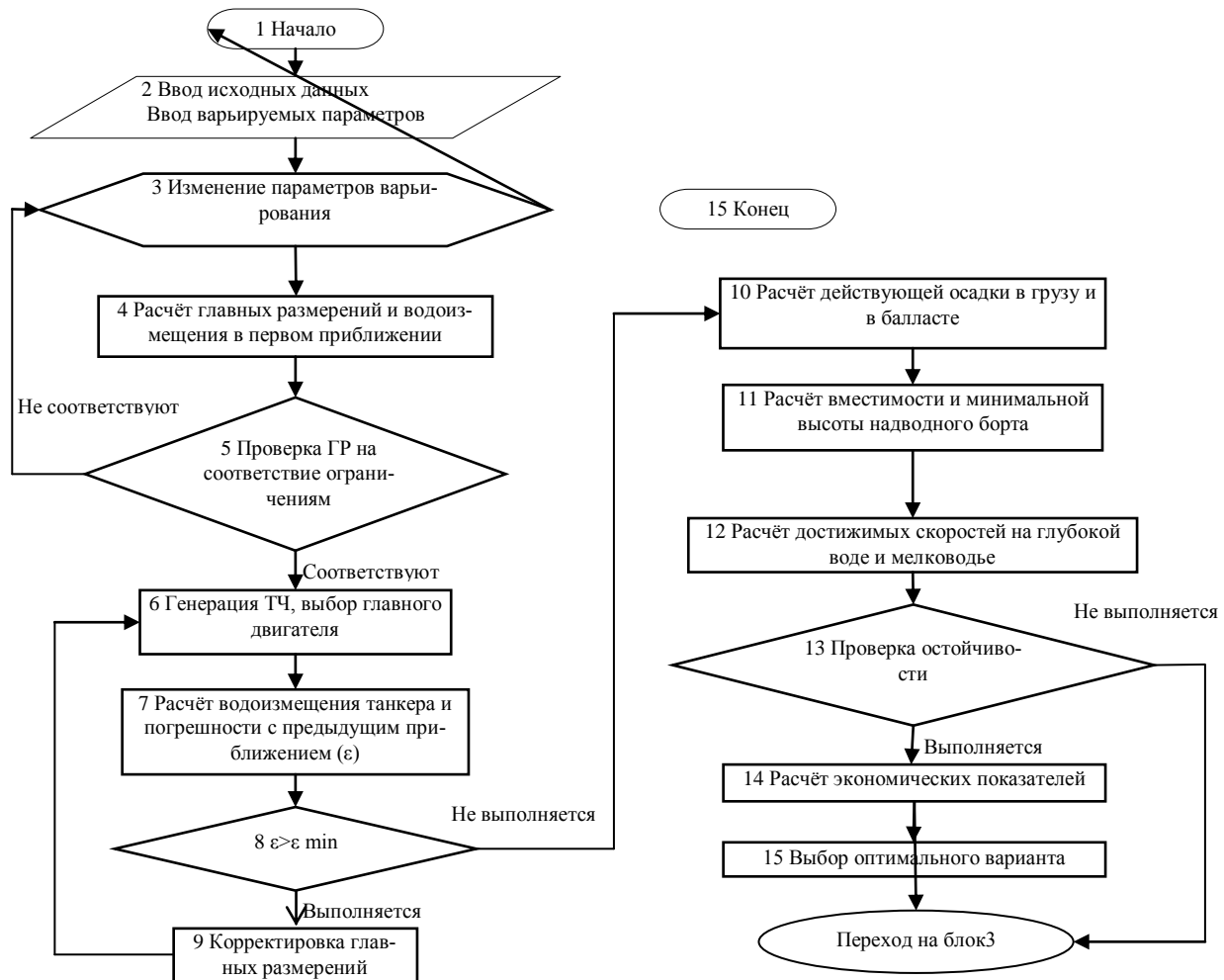


Рис. 1. Блок-схема оптимизации главных элементов судна

Необходимая в этих расчётах для выбора главных двигателей мощность пропульсивного комплекса ( $N$ ) определяется расчётным путём.

$$N = \frac{R(v) \times v}{X \eta_{\text{п}} \eta_{\text{д}}} \times \frac{(1-t)}{(1-w)}, \quad (7)$$

где  $R(v)$  – зависимость сопротивления воды от скорости хода;  $v$  – скорость хода судна;  $X$  – количество движителей;  $\eta_{\text{п}}$  – КПД передачи;  $\eta_{\text{д}}$  – КПД движителя;  $t$  – коэффициент засасывания;  $w$  – коэффициент попутного потока.

Коэффициенты  $\eta_{\text{п}}$ ,  $\eta_{\text{д}}$  – определяются по аппроксимированным диаграммам для расчёта 4х лопастных винтов.

Сопротивление воды движению судна пересчитывается с судна прототипа с использованием коэффициентов влияния по данным Авдеева.

Полученное водоизмещение сравнивается с водоизмещением из предыдущего приближения. При их существенном различии производится корректировка главных размеров, или дедвейта при решении задачи 4.

Для танкера с окончательно принятыми ГЭ проверяется обеспечение минимального надводного борта, которое характеризует запас плавучести судна. При этом считается, что спроектированный танкер имеет стандартные бак и ют.

В соответствии с Правилам [3, 4] необходимо, чтобы:

$$H \geq H_{\min}, \quad (8)$$

где  $H_{\min}$  – минимальный надводный борт танкера, принимаемый в зависимости от его класса по Правилам [3, 4].

Специфичным состоянием нагрузки для танкера, помимо хода в «полном грузу», является «обратный переход» – порожнём с балластом на протяжении всей линии эксплуатации. Балластное состояние должно обеспечивать нормальную эксплуатацию судна, для чего необходимо иметь соответствующее заглубление носа и кормы.

Осадка носом оговаривается Правилами [3], осадка кормой должна обеспечивать заглубление движительно-рулевого комплекса, для эффективной его работы. Таким образом, осадка порожнём в балласте на миделе определяется уравнением:

$$T_{\text{б}} = \frac{h/2 + 1,1 \times D_{\text{ГВ}}}{2}, \quad (9)$$

где  $h$  – высота волны, м;  $D_{\text{ГВ}}$  – диаметр гребного винта в первом приближении.

Водоизмещение танкера порожнём с балластом находится суммированием соответствующих нагрузок:

$$D_{\text{б}} = D_{\text{пор}} + P_{\text{б}} + Dw, \quad (10)$$

где  $D_{\text{пор}}$  – водоизмещение порожнего танкера;  $Dw$  – дедвейт.

В блоке 11 выполняется расчёт вместимости танкера по условию:

$$V_{\text{т}} \geq P/\rho_{\text{гр}} + V_{\text{от}}, \quad (11)$$

где  $V_{\text{т}}$  – объём танковой части корпуса, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{от}}$  – объём отстойных танков, м<sup>3</sup>.

При расчёте объёма грузовых и отстойных танков учитываются потери на набор, второе дно, вторые борта и реальный объём корпуса в районе грузовых танков ( $V$ ), который определяется по теоретическому чертежу, сгенерированному в блоке б.

При не выполнении условия (11) увеличивается высота борта судна и повторяется расчёт водоизмещений и осадок.

Расчёт ходкости судна в блоке 12 проводится по зависимости (7), с учётом особенностей линии эксплуатации. Это позволяет найти массив скоростей хода танкера на глубокой воде в грузу и порожнём, и на участках с ограниченной глубиной фарватера.

Проверка остойчивости танкера по желанию пользователя может выполняться по методу начальной остойчивости, либо с использованием программы PROST, реализующей проверку остойчивости по Правилам [3]. Такой подход позволяет учесть реальные условия эксплуатации и загрузки судна, перетекание жидкого груза в танках. При неудовлетворении спроектированного судна требованиям остойчивости, расчётный вариант исключается из рассмотрения.

Для проведения технико-экономической оценки эффективности танкера в блоке 14 рассчитывается строительная стоимость и стоимость эксплуатации танкера в заданный период.

Строительная стоимость танкера определяется суммой затрат на материал, заработную плату и другие производственные расходы:

$$R = 1,35 \times \sum_{i=1}^{10} R_i \times (1 + \varphi), \quad (12)$$

где  $R_1$  – стоимость материалов;  $R_2$  – транспортно заготовительные расходы;  $R_3$  – основная заработная плата;  $R_4$  – дополнительная заработная плата;  $R_5$  – единый социальный налог;  $R_6$  – расходы на подготовку и освоение производства;  $R_7$  – общепроизводственные расходы;  $R_8$  – общехозяйственные расходы;  $R_9$  – прочие производственные расходы;  $R_{10}$  – неучтённые расходы;  $\varphi$  – процент налогов.

Стоимость материалов, необходимых для постройки судна, рассчитывается в зависимости от стоимости 1 т их массы:

$$R_1 = k \sum_{i=1}^m M_i \cdot \Theta_i, \quad (13)$$

где  $k$  – коэффициент серийности;  $M_i$  – масса  $i$ -й статьи нагрузки;  $\Theta_i$  – стоимость 1 т материала или оборудования.

Основная заработная плата рабочих определяется с учётом трудоёмкости изготовления соответствующих конструкций танкера:

$$R_3 = 3,3 \cdot k_d \cdot k_r \cdot \sum_{i=1}^m \frac{M_i}{\varepsilon_i} \cdot k_c, \quad (14)$$

где  $k_d$  – коэффициент прочих доплат;  $k_r$  – районный коэффициент;  $\varepsilon_i$  – удельная трудоёмкость работ;  $k_c$  – коэффициент серийности.

Эксплуатационные расходы по судну включают в себя следующие составляющие:

$$Z = k_{\text{доп}} \sum_{i=1}^7 Z_i + Z_8 + Z_9, \quad (15)$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент, учитывающий платежи на комплексное и хозяйственное обслуживание судна, а также прочие прямые расходы по судну;  $Z_1$  – оплата труда экипажа;  $Z_2$  – единый социальный налог;  $Z_3$  – бесплатное питание экипажа;  $Z_4$  – расходы на топливо;  $Z_5$  – расходы на смазочные и другие материалы;  $Z_6$  – расходы на ремонт судна;  $Z_7$  – расходы на износ малоценных и быстроизнашивающихся предметов;  $Z_8$  – плата по кредиту;  $Z_9$  – портовые сборы на морском участке. Величина сборов на речном участке эксплуатации учтена коэффициентом  $k_{\text{доп}}$ .

Объёмы выплат по кредиту могут существенно отличаться в зависимости от выбранных условий кредитования. В разработанной математической модели процентная ставка постоянна на протяжении всего срока возврата кредита, который составляет 10 лет.

Масса топлива, необходимая для работы судна в течении кругового рейса, учитывает работу главных двигателей в ходу и на манёврах, а также работу дизель генераторов во время стоянки и погрузки – выгрузки.

Продолжительность кругового рейса грузового судна можно представить суммой составляющих, которые описывают типичные операции его работы на линии:

$$t_a = t_x + t_{\text{сл}} + t_{\text{гр}} + t_m + t_{\text{тех}} + t_{\text{ож}}, \quad (16)$$

где  $t_x$  – ходовое время;  $t_{\text{сл}}$  – время шлюзования;  $t_{\text{гр}}$  – продолжительность погрузки выгрузки;  $t_m$  – время манёвров;  $t_{\text{тех}}$  – техническое время, связанное с оформлением документов;  $t_{\text{ож}}$  – время ожидания.

Эксплуатация судна на морском участке связана с вероятностью попадания рейса в шторм. Если высота волн будет более допустимой по классу Регистра, танкер должен будет находиться в порту, что увеличит время стоянки. При наличии допустимого волнения у судна произойдёт потеря скорости. В разработанной математической модели потеря скорости на волнении учитывается только на морском участке линии эксплуатации. На речном участке считается, что более существенное снижение скорости произойдёт вследствие влияния мел-

ководья, для чего введён коэффициент влияния ограниченного фарватера на остаточное сопротивление.

Таким образом, время хода представляется следующей суммой:

$$t_x = t_{\text{xm}} + t_{\text{xp}}, \quad (17)$$

где  $t_{\text{xm}}$  – время хода на морском участке в прямом и обратном рейсе;  $t_{\text{xp}}$  – время хода на речном участке в прямом и обратном рейс, определяемое по выражению (18).

$$t_{\text{xp}} = \sum_{i=1}^{n+1} \left( \frac{l_i}{v_{i,1}} + \frac{l_i}{v_{i,2}} \right), \quad (18)$$

где  $l_i$  – длина участка;  $v$  – скорость хода;  $n$  – количество участков мелководья.

Время хода на морском участке может быть представлено:

$$t_{\text{xm}} = \frac{l}{v_0} \cdot \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^m a_i + \sum_{i=1}^m \frac{v_i}{v_0} a_i} \quad (19)$$

где  $l$  – длина морского участка;  $v_0$  – скорость хода на глубокой тихой воде;  $m$  – количество различных обеспеченностей волнения;  $a_i$  – повторяемость волнения с  $i$  обеспеченностью;  $\frac{v_i}{v_0}$  – потеря скорости на  $i$ -м участке.

По предложенной математической модели разработана программа, которая позволяет оптимизировать главные элементы танкеров смешанного (река-море) плавания. С целью проверки адекватности разработанной мат. модели были просчитаны элементы двух танкеров. Результаты расчёта представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сопоставление результатов расчёта с реальным судном

	Проект	Расчёт	Проект	Расчёт
Класс	R2-RSN	R2-RSN	М-СП	М-СП
Водоизмещение, т	7670	7682	7750	7686
Длина по КВЛ, м	134,1	132	139	138
Ширина, м	16,6	16,6	16,6	16,6
Высота борта, м	6,1	6,27	6,1	6,33
Осадка в грузу на миделе, м	3,86	3,97	3,74	3,8
Коэффициент общей полноты	0,893	0,883	0,898	0,883
Мощность, кВт	1860	1870	1860	1870
Водоизмещение порожнём, т	2450	2548	2320	2211
Скорость, км/ч	18,6	20	18,6	20
Дедвейт, т	5220	5134	5430	5470

Как видно из таблицы, полученные результаты близки к реальным проектам, поэтому разработанную модель можно использовать для проектирования и исследования влияния различных параметров на показатель эффективности танкера.

С помощью разработанной программы было выполнено оценка зависимости показателя эффективности танкера от главных элементов. Поскольку некоторые характеристики танкера изменяются дискретно, то и функция цели получается не гладкой. Поэтому для определения общей тенденции при изменении параметров она была аппроксимирована линейной зависимостью. Некоторые из полученных результатов показаны на рис. 2, 3.

В качестве коэффициента сравнения судов использована относительная прибыль за год ( $\Pi/\Pi_B$ , где  $\Pi_B$  – прибыль от эксплуатации базового танкера).

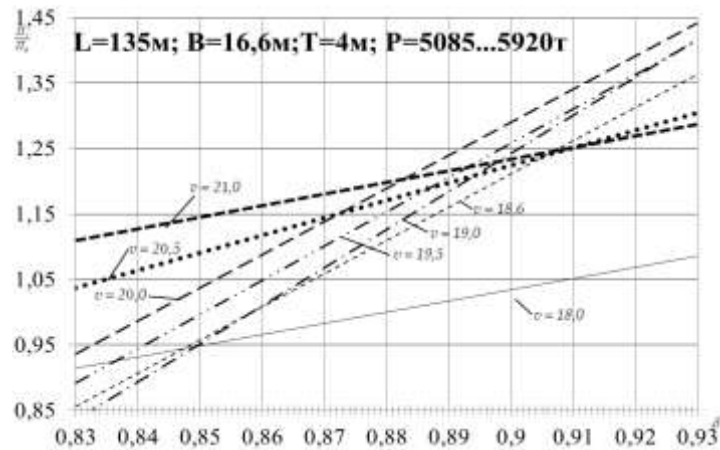


Рис. 2. Зависимость относительной прибыли танкера от коэффициента полноты и скорости хода при постоянных главных размерах

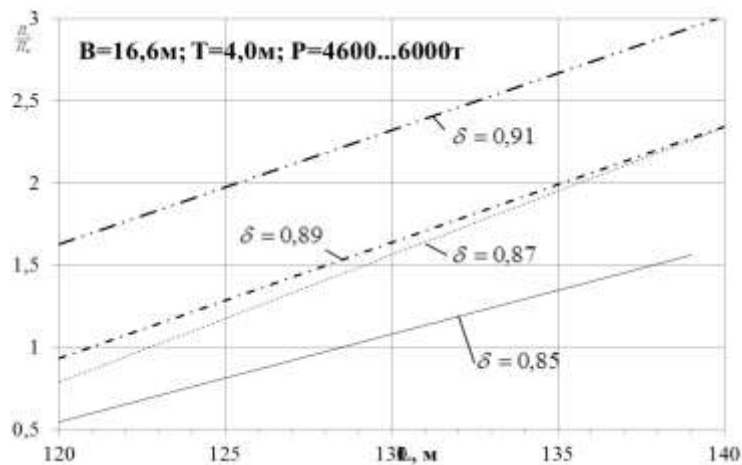


Рис. 3. Зависимость относительной прибыли танкера от коэффициента полноты и длины судна, при постоянной скорости хода, ширине и осадке

Аналогичные графики можно построить и для судов, имеющих постоянную грузоподъемность, варьируя главные элементы.

Полученные зависимости показывают, что с ростом коэффициента полноты эффективность судна повышается за счёт увеличения грузоподъемности судна. Увеличение главных размерений также положительно сказывается на эффективности танкера. В то же время увеличение скорости хода выше 20 км/ч снижает тенденцию этого роста. Иная картина наблюдается при сохранении грузоподъемности. В этом случае при некоторых значениях варьируемых параметров наблюдается падение относительной прибыли от эксплуатации судна, что связано с существенным ростом расходов на его эксплуатацию.

Полученные результаты во многом подтверждают практику проектирования последних лет, когда главные размерения судов смешанного плавания выбираются максимально возможными для линии «претендента».

#### Библиографический указатель

1. Кочнев, Ю.А. Анализ элементов и характеристик «малых» танкеров // 11-й международный научно-промышленный форум «Великие реки '2009»: труды конгресса.— Н. Новгород: ННГАСУ 2010. Т. 2. С. 300–303.

2. **Кочнев, Ю.А.** Математическая модель расчёта массы танкера смешанного (река-море) плавания // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2010. № 1. С. 7–12.
3. Российский Речной Регистр. Правила. В 4-х томах. Т. 4. – М., 2008. – 406 с.
4. Правилами Классификации и постройки морских судов. В 2-х томах. Т. 1. 2008.

*Дата поступления  
в редакцию 09.11.2010*

**U.A. Kochnev**

### **OPTIMIZATION ELEMENTS OF TANKER ON INITIAL DESIGN STAGE**

Considered question optimization elements of tanker see-river fleet on initial design stage. Mathematical model of calculation are presented. Received of graphic dependences for evaluation influence of general elements on efficient factor.

*Key words:* tanker, general elements, mathematical model, optimality criterion.