

# ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОСТАВНЫХ СУДОВ И БАРЖЕ-БУКСИРНЫХ СОСТАВОВ СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ. ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность проблемы.** Необходимость в судах смешанного плавания (ССП), включая барже-буксирные составы (ББС) и составные суда (СС). Интерес со стороны судовладельцев. Отсутствие исследований характеристик ВВП Украины как факторов, определяющих основные характеристики судов, работающих с речных портов Днепра. Отсутствие методик определения основных характеристик ССП нового поколения, включая ББС и СС. Важность такой задачи для проектантов, судовладельцев и в целом для государства.

**Объект исследования.** Проектирование барже-буксирных составов и составных судов смешанного река-море плавания.

**Предметом исследования** являются характеристики барже-буксирных составов и составных судов смешанного река-море плавания, обеспечивающие оптимальные значения показателей их экономической эффективности.

**Цель научного исследования.** Разработка метода определения оптимальных главных размерений и характеристик ББС и СС СП, в том числе, – для эксплуатации в речной и морской воднотранспортной системах Украины.

## **Основные задачи научного исследования:**

- анализ путевых и коммерческих условий эксплуатации перспективных ССП для линии Днепр – Черное море – Дунай с систематизацией внешних воздействий на их корпуса и основных ограничений на главные размерения;
- анализ технического состояния исследуемых судов, риска их эксплуатации, идентификация основных опасностей эксплуатации судов внутреннего (СВП) и ССП, в том числе ББС и СС, с целью выявления факторов, оказывающих определяющее влияние на проектирование этих объектов;
- анализ применимости существующих сцепных устройств ББС и СС и их соответствия предполагаемому району эксплуатации;
- анализ металлоемкости ССП нового поколения с целью определения составляющих их весовой нагрузки;
- создание метода определения оптимальных главных размерений и характеристик ББС и СС СП, включающего в себя математическую модель инженерных и навигационных свойств, математическую модель функционирования и оптимизационную задачу, позволяющую определять оптимальные значения коэффициента общей полноты  $C_b$  для разных эксплуатационных скоростей и линий, и его реализация в виде программного комплекса;
- разработка научных рекомендаций по выбору оптимальных вариантов ББС и СС для Украины.

# АНАЛИЗ СООТВЕТСТВИЯ СУДОВ СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ ДЛЯ УКРАИНЫ, ВКЛЮЧАЯ БАРЖЕ-БУКСИРНЫЕ СОСТАВЫ И СОСТАВНЫЕ СУДА, СОВРЕМЕННЫМ УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

2

## Экономический фактор

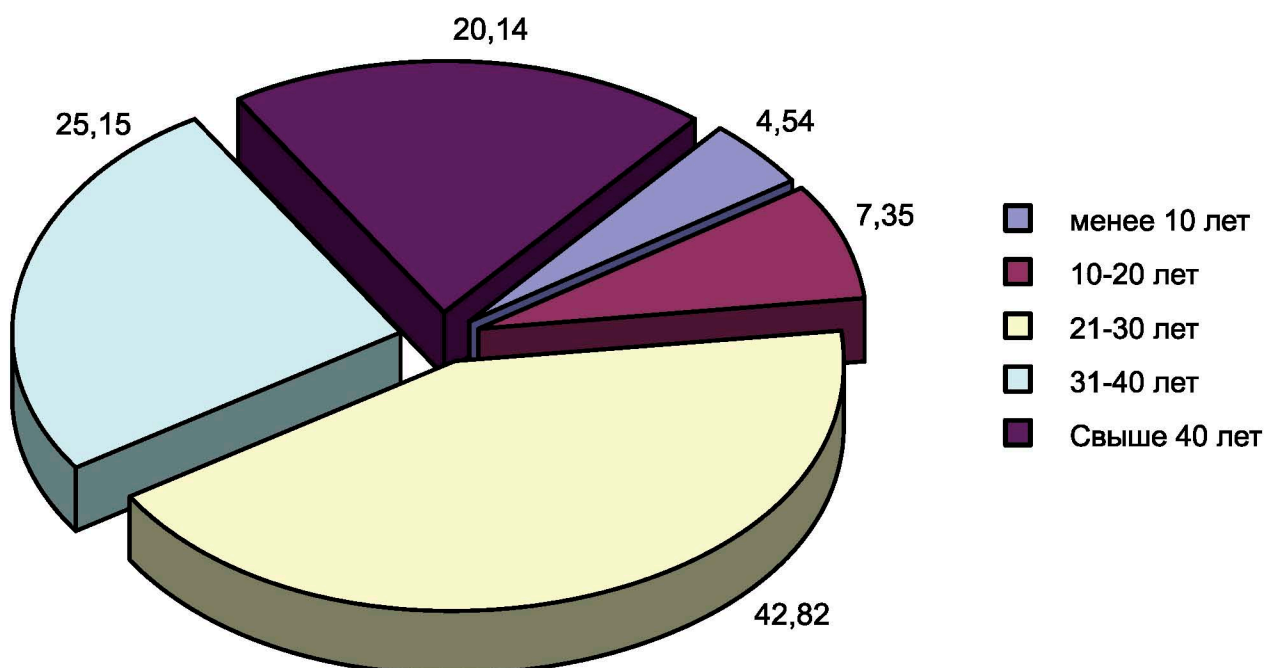
- 1) Перспективы роста грузопотоков как по Дунаю («Стратегия ЕС...»), так и по Днепру.
- 2) Ожидание повышения тарифов на перевозку грузов железной дорогой.
- 3) Интерес отечественных судовладельцев/грузовладельцев к современным разработкам в области речных и судов смешанного плавания для Украины.

## Технический фактор

Средний возраст судов под РУ:

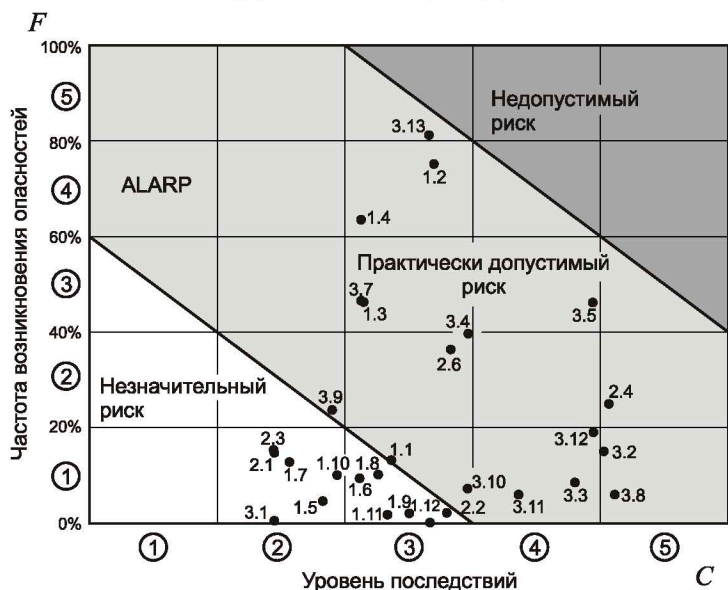
- всех транспортных судов, находящихся под наблюдением РУ в 35,0 лет;
- самоходных сухогрузных судов в 35,5 лет;
- несамоходных сухогрузных судов в 28,5 лет;
- буксирного флота, обслуживающего несамоходные сухогрузные и наливные суда, в 43,5 лет.

## Распределение судов по возрастным группам (в %)

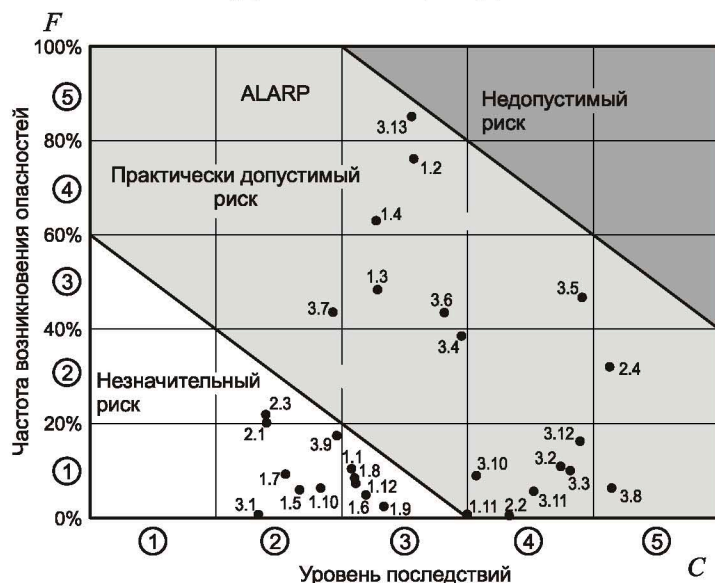


# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ БАРЖЕ-БУКСИРНЫХ СОСТАВОВ И СОСТАВНЫХ СУДОВ. ИССЛЕДОВАНИЕ РИСКА ЭКСПЛУАТАЦИИ

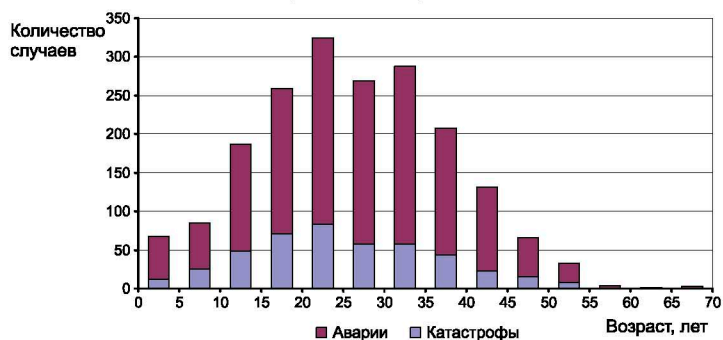
Матрица риска СВП и ССП (для катастроф)



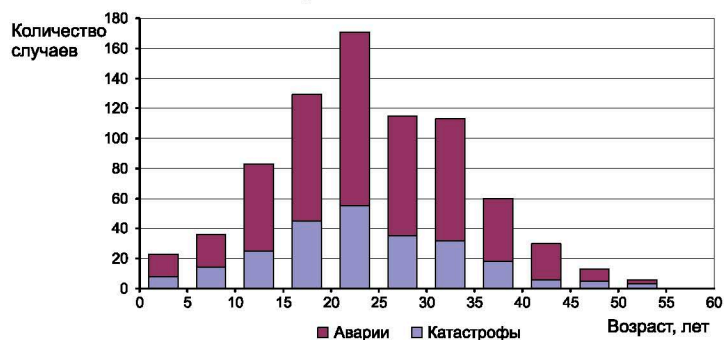
Матрица риска ББС и СС (для катастроф)



Зависимость числа аварий и катастроф от возраста судна

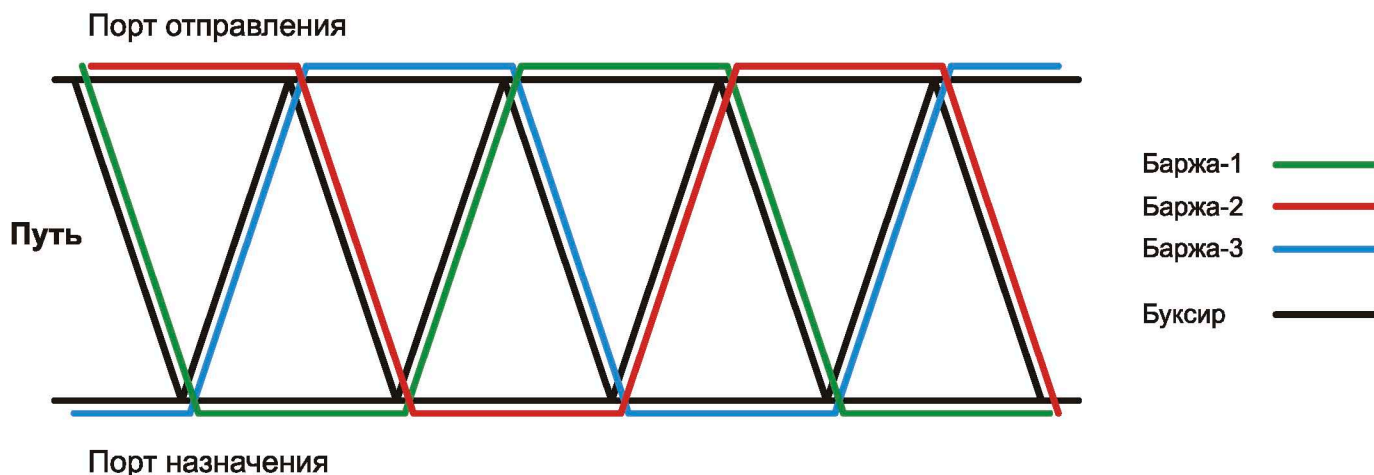


Зависимость числа аварий и катастроф от возраста ББС



## ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ББС КАК ГЛАВНЫЙ ФАКТОР ПРЕИМУЩЕСТВА ПЕРЕД САМОХОДНЫМИ СУДАМИ

Концепция модели «вертушки» на примере 1 буксира и 3 барж



## СВОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО ТОЛКАЧАМ-ПРОТОТИПАМ

Мощность, кВт	Длина габаритная $L_{габ}$ , м	Ширина габаритная $B_{габ}$ , м	Высота борта $D$ , м	Надводный габарит $H_{габ}^{надв}$ , м	Осадка $d_{max}$ , м	Класс
515-2600	24,60-57,45	8,00-13,00	2,60-5,36	4,50-13,40	1,50-3,60	P-R2-RSN

## СВОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО САМОХОДНЫМ СУДАМ-ПРОТОТИПАМ

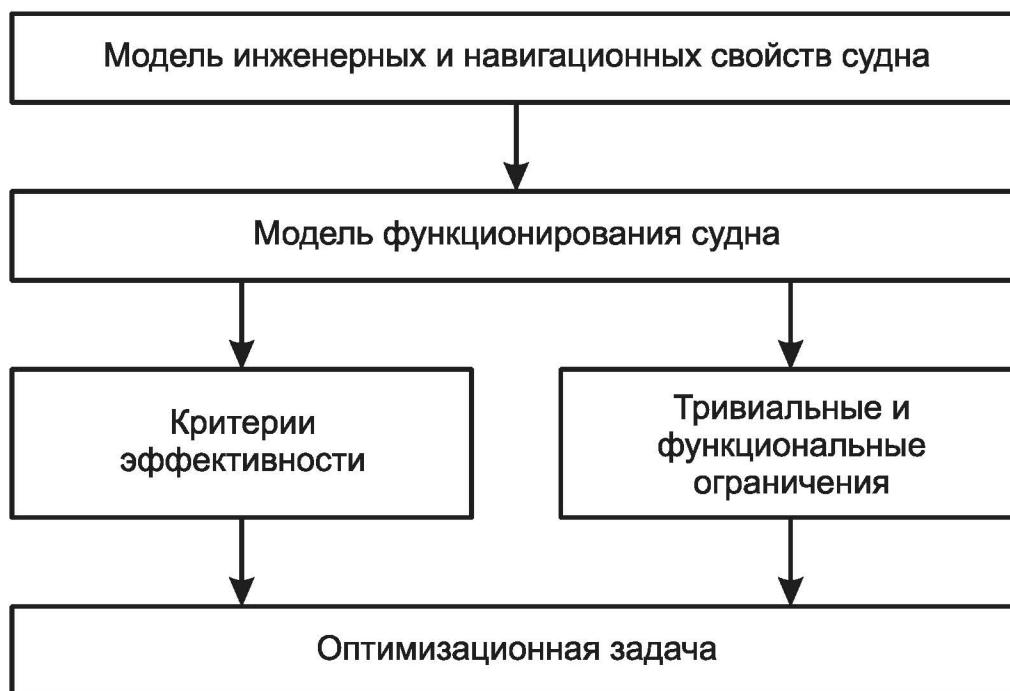
Мощность, кВт	Грузоподъемность $P$ , т	Длина габаритная $L_{габ}$ , м	Ширина габаритная $B_{габ}$ , м	Высота борта $D$ , м	Надводный габарит $H_{габ}^{надв}$ , м	Осадка $d_{max}$ , м	Класс
772-1764	1005-4950	72,95-138,40	12,30-16,70	2,20-5,50	9,78-12,50	1,71-3,50	P-M-ПР

## СВОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО СУХОГРУЗНЫМ БАРЖАМ-ПРОТОТИПАМ

Грузоподъемность $P$ , т	Длина габаритная $L_{габ}$ , м	Ширина габаритная $B_{габ}$ , м	Высота борта $D$ , м	Осадка $d_{max}$ , м	Класс
2000-5100	76,50-133,26	11,40-17,20	3,20-5,70	2,64-3,756	M-R3-RS

СС проекта 1566 (на базе «Волго-Дона»)





## Анализ путевых условий для дальнейшего выбора главных размерений судов БС и СС СП (на примере «Днепро-макс» класса)

Условия, влияющие на выбор габаритной длины  $L_M$

Характеристика	Максимально возможное значение $L_M$ , м
Минимальный радиус закругления судового хода реки Днепр $R_{min} = 800$ м	$L_M \approx 282$ (при ширине состава 17,2 м)
Длины причалов $L_{ПР} = 120..350$ м	120 (для грузовой секции состава), 140 – 150 для самоходного судна
Минимальная длина рабочей камеры шлюза $L_{ШК} = 150$ м	150 (при эксплуатации выше Киевского шлюза), 270 (при эксплуатации до Киевского шлюза)

Условия, влияющие на выбор габаритной ширины  $B_M$

Характеристика	Максимально возможное значение $B_M$ , м
Минимальная ширина камеры шлюзов на Днепре $B_{ШК} = 18,0$ м	17,2 (без учета наледи, при появлении ледового покрова на стенках камер шлюзов допускается запас по ширине не менее 0,4 м от края ледового покрова)

Условия, влияющие на выбор осадки  $d$

Характеристика портов	Максимально возможное значение $d$ , м
Река Днепр, глубина судового хода $d_{ВВИ} = 3,2...3,85$ м	3,00 – 3,65

Условия, влияющие на выбор надводного габарита  $H_{НГ}$

- При эксплуатации выше Запорожья без ожидания разводки Кременчугского и Днепропетровского двухъярусного мостов  $H_{НГ} = 8,57$  м;
- При эксплуатации до Запорожья  $H_{НГ} = 16,70$  м.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЖЕНЕРНЫХ И НАВИГАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СУДНА (ММИНСС)

6

Проверка максимально допустимой габаритной длины  $L_m$  состава для наиболее крутого поворота реки (с применением метода Г.И. Ваганова)

$$L_m \leq 0,5 \cdot b \cdot \left( \sqrt{\frac{R}{B_c}} - \frac{c}{v_p} \right)$$

Определение максимально допустимой длины составов «Днепро-макс» класса

Варианты составов	$R/L$		$L_m$ (базовая), м		$L_m$ , м (пересчёт с учетом фактических ширин составов)		$L_m$ , м (пересчёт с учетом скорости течения 2 км/ч)	
	Вверх по реке	Вниз по реке	Вверх по реке	Вниз по реке	Вверх по реке	Вниз по реке	Вверх по реке	Вниз по реке
Одноточный состав при $b/B = 7,14$ ( $B = 11,20$ м)	1,67	2,65	479	302	423	255	<b>396</b>	<b>282</b>
Двухточный состав при $b/B = 4$ ( $B = 20,0$ м)	1,96	3,29	408	243	368	210	<b>341</b>	<b>215</b>

### Учет эксплуатационных ограничений

Ширина ходовой полосы, занимаемая составом на повороте реки, с учетом запаса

$$b_{hm} = b_h + \Delta b_h. \quad b_h = L \left\{ \frac{B}{L} + [K_1 \bar{b}_o + K_2 \bar{b}_c] \left( K_o - \frac{4,1S}{K_n} - 0,06B \right) \right\}, \text{ м,}$$

Запас  $\Delta b_h$  (для учета неустановившегося характера движения состава на повороте реки, влияния ветра, свального течения и других случайных факторов)  $\Delta b_h = B(K_1 + K_2 \Omega)$

### Ширина ходовой полосы

	Схема 1+1				Схема 1+2 (одна «под бортом»)			
	По течению		Против течения		По течению		Против течения	
	В грузу	Порожнем	В грузу	Порожнем	В грузу	Порожнем	В грузу	Порожнем
$L$ , м	260	260	260	260	260	260	260	260
$B$ , м	17,2	17,2	17,2	17,2	34,4	34,4	34,4	34,4
$b_{hm}$	<b>60,79</b>	<b>87,00*</b>	<b>47,39</b>	<b>71,78</b>	<b>90,70</b>	<b>123,62</b>	<b>76,49</b>	<b>107,26</b>
$b$	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>

\* – При прохождении крутых поворотов при движении по течению скорость состава, идущего без груза (порожнем), не должна превышать 12 км/ч

Высота борта  $D$  (для ССП высота борта назначается в пределах 5 – 6,5 м)

$$D \geq d + F_{min}$$

### Соотношения длин судов смешанного плавания

Среднее значение	$L/L_{pp}$	$L'/L'_{pp}$	$L_m/L$	$L_m/L_{pp}$	$L_m/L'$	$L_m/L'_{pp}$
Самоходные	1,0236	1,0132	1,0150	1,0389	1,0249	1,0386
Несамоходные			1,0105			

Расчетная ширина

$$B = B_m - 0,2$$

Проверка соотношений главных размерений

$$L/B = 5,5 \div 8,5, \quad B/d = 3,26 \div 5,35, \quad D/d = 1,15 \div 1,40, \quad L/D = 15,1 \div 27,0, \quad B/D = 2,65 \div 3,30.$$

## Основные характеристики

Функциональные ограничения мореходности по безопасности плавания, связанные с обеспечением прочности и остойчивости (положение  $z_g$ ) состава или составного судна, выражаются через регрессионные зависимости весовой нагрузки самоходных и несамоходных СВП и ССП, построенные на основе обработки данных по СВП и ССП нового поколения, спроектированными МИБ и другими проектными организациями.

### Водоизмещение в грузу

Водоизмещение в грузу каждого транспортного средства, входящего в состав:

$$\Delta_i = \rho \cdot C_b \cdot L \cdot B \cdot d,$$

### Грузовместимость

Грузовместимость  $W$  каждой из секций состава определяется либо через удельные грузовместимости  $q_i$ , либо индивидуально при условии наличия данных по размерам грузовой зоны, включая высоту комингса, если он предусматривается.

	Грузовместимость, м <sup>3</sup> /т
Сухогрузные самоходные ССП. Осадка по ЛГВЛ	$q_2 = 1,00 + 3,75 \cdot 10^{-5} LBD'_1$
Сухогрузные самоходные ССП. Осадка в реке (3,60 м)	$q_1 = 1,39 + 5,27 \cdot 10^{-5} LBD'_1$
Сухогрузные самоходные ССП. Осадка в реке (3,20 м)	$q_{11} = 1,12 + 5,27 \cdot 10^{-5} LBD'_1$
Сухогрузные несамоходные ССП. Осадка в реке (3,20 м)	$q'_{11} = 1,31 + 5,27 \cdot 10^{-5} LBD'_1$

Длина грузовой зоны

$$L_{ГП} = 0,005 \cdot LBD' + 14,23.$$

Ширину грузовой зоны  $B_{ГП}$  рекомендуется принимать в диапазоне  $0,77 \div 0,85 \cdot B$ . Высота комингсов  $h_K$  для современных сухогрузных ССП равна  $1,2 \div 3,6$  м, для сухогрузных ССП, близких к максимальным габаритам ВВП («Днепро-макс», «Волго-Дон макс» класс)  $h_K = 3,3 \div 3,6$  м.

### Расчет нагрузки масс и водоизмещения порожнем

Чистая грузоподъемность несамоходного судна определяется как:

$$P_{cp} = \Delta - \Delta_{nop}, \text{ т.}$$

Дедвейт самоходного судна:

$$dwt = \Delta - \Delta_{nop}, \text{ т.}$$

Грузоподъемность:

$$P_{cp} = dwt - P_{зан}, \text{ т.}$$

Водоизмещение порожнем СССП определено по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta_{нор} = & p_{mk} \cdot L \cdot B \cdot D_1' \cdot C_B + \\ & + \left[ (p_{нр} + p_{об}) + 2 \cdot \left( \frac{\sum_1^a \ell_n \cdot h_n + \sum_1^b \ell_p \cdot h_p}{L} \right) \cdot n_{эк} \right] + \\ & + (p_{лн} + p_{нф}) \cdot L + (p_{об} + p_{ок} + p_{уз} + p_y + p_{ос}) \cdot (L \cdot B \cdot D_1')^{2/3} + \\ & + \frac{P_{сэу} \cdot N_e}{n} + 0,03 \div 0,05 \cdot \Delta_{нор} \end{aligned}$$

Водоизмещение порожнем несамоходных судов

$$\Delta_{нор} = P_{mk} + P_y + P_{ос} + P_{сэу} + \Delta_{нор}^3,$$

где  $P_{mk} = p_{mk} \cdot c \cdot LBD$   $P_y = p_y \cdot LBD$   $P_{ос} = p_{ос} \cdot LBD$   $P_{сэу} = p_{сэу} \cdot LBD$   $\Delta_{нор}^3 = \delta_{нор}^3 \cdot LBD$

### Коэффициент удельной металлоемкости для несамоходных судов нового поколения

Тип баржи	Зависимость	Значения коэффициентов
Показатель удельной металлоемкости $p_{mk} = P_{mk} / c \cdot LBD$ , т/м <sup>3</sup>		
Сухогрузные баржи-площадки	$\alpha - 5 \cdot 10^{-6} LBD$ (для класса Л, R3-RSN); $\alpha - 4 \cdot 10^{-6} LBD$ (для класса Р, О, О-ПР, R1)	0,1 (Л), 0,1503 (R3-RSN), 0,1052 (Р), 0,1333 (О), 0,1422 (О-ПР), 0,1631 (R1)
Сухогрузные бункерные баржи	$\alpha - 3 \cdot 10^{-6} LBD$	0,0895 (Р), 0,1317 (Р для перевозки тяжеловесов), 0,1014 (О), 0,1513 (О для перевозки тяжеловесов)
Сухогрузные трюмные баржи	$\alpha - 2 \cdot 10^{-6} LBD$ (Л, Р); $\alpha - 3 \cdot 10^{-6} LBD$ (М); $\alpha - 4 \cdot 10^{-6} LBD$ (О-ПР); $\alpha - 5 \cdot 10^{-6} LBD$ (R3-RSN); $\alpha - 6 \cdot 10^{-6} LBD$ (R2-RSN, R2)	0,0643 (Л), 0,0757 (Р), 0,0984 (М), 0,1323 (О-ПР), 0,154 (М-ПР), 0,1722 (R3-RSN), 0,1932 (R2-RSN), 0,1982 (R2)

Водоизмещение порожнем для несамоходных судов (оценка)

$$\Delta_{нор} = c \cdot k \cdot y \cdot \delta_{нор} \cdot LBD.$$

Коэффициент влияния к-та общей полноты  $C_b$  несамоходных судов на металлоемкость:

$$c = \left( \left( C_b / C_b' \right) - 1 \right) \cdot \mu + 1,$$

где  $C_b'$  – базовый расчетный коэффициент общей полноты  $C_b' = 0,890$ ,  $\mu$  – коэффициент весомости металлического корпуса в структуре водоизмещения порожнем  $\mu = 0,78$  для сухогрузных барж.



# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЖЕНЕРНЫХ И НАВИГАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СУДНА (ММИНСС)

Наименование статьи нагрузки СССП	Формула	Измеритель масс	Примечание
Металлический корпус без надстроек и рубок, ледовых подкреплений	$P_{mk} = p_{mk} \cdot L \cdot B \cdot D_1' \cdot C_B$	$9,15 \cdot 10^{-2*}$	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		$7,15 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		$8,25 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
		$9,40 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Главная и верхняя палубы с набором	$P_{en} = p_{en} \cdot L \cdot B^{3/2}$	$1,81 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		$2,66 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		$2,93 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Наружная обшивка	$P_{no} = p_{no} \cdot \Omega \cdot d^{1/3} \cdot D^{1/2}$	$2,38 \cdot 10^{-2*}$	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		$2,00 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		$2,19 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
		$2,27 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Второе дно с междудонным набором	$P_{\text{вд}} = \frac{p_{\text{вд}} \cdot C_B \cdot L \cdot B \cdot d}{D}$	$19,5 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		$25,5 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		$25,9 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Набор бортов	$P_{\text{б}} = \frac{p_{\text{б}} \cdot L \cdot D_1' \cdot h_B^{3/2}}{d}$	$18,8 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		$4,85 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		$3,95 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Продольные переборки второго борта с набором	$P_{mn} = p_{mn} \cdot 0,75L \cdot D$	$16,3 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		$29,8 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		$35,0 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Поперечные переборки	$P_{\text{ном}} = p_{\text{ном}} \cdot C_B \cdot m \cdot B \cdot D^{3/2}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		$7,3 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		$7,7 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Местные подкрепления основного корпуса	$P_{mn} = p_{mn} \cdot L \cdot B \cdot D_1'$	$0,32 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		$0,28 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		$0,28 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Ледовые подкрепления	$P_{ln} = p_{ln} \cdot L$	$36,0 \cdot 10^{-2}$	Лед 20 (PPP)
		$50,5 \cdot 10^{-2}$	Ice1 (PMPC)
		$72,5 \cdot 10^{-2}$	Ice2 (PMPC)
Надстройки и рубки	$P_{np} = p_{np} + \left( \frac{\sum_1^a \ell_n h_n + \sum_1^b \ell_p h_p}{L} \right) n_{\text{эк}}$	77,0	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		81,5	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		113,9	$h_B = 7,0 \text{ м}$
		113,9	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Подкрепления и фундаменты	$P_{n\phi} = p_{n\phi} \cdot L$	$30,7 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		$26,9 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		$26,0 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Дельные вещи	$P_{\text{дв}} = p_{\text{дв}} \cdot (L \cdot B \cdot D_1')^{2/3}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		$5,0 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		$6,5 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Окраска, покрытия, цементировка	$P_{ок} = p_{ок} \cdot (L \cdot B \cdot D_1')^{2/3}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		$4,2 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		$6,2 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Изоляция, зашивка	$P_{из} = p_{из} \cdot (L \cdot B \cdot D_1')^{2/3}$	$9,3 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		$8,8 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		$6,8 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Оборудование помещений	$P_{об} = p_{об} + \left( \frac{\sum_1^a \ell_n h_n + \sum_1^b \ell_p h_p}{L} \right) n_{\text{эк}}$	13	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		11	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		4	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Судовые устройства	$P_y = p_y \cdot (L \cdot B \cdot D_1')^{2/3}$	$33,0 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		$45,0 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		$52,5 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Общесудовые системы	$P_{oc} = p_{oc} \cdot (L \cdot B \cdot D_1')^{2/3}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 2,5 \text{ м}$
		$13,2 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 6,0 \text{ м}$
		$18,2 \cdot 10^{-2}$	$h_B = 7,0 \text{ м}$
Судовая энергетическая установка (включая электроэнергосистему)	$P_{cзв} = \frac{P_{cзв} \cdot N_E}{n}$	46,2	река-море
		54,1	море-река

\* – СССП с пониженным надводным габаритом «устьевского» типа

## Буксировочное сопротивление и мощность

Для одиночной баржи и судна-толкача

$$R_t = \frac{\rho}{2} \cdot \zeta \cdot \Omega \cdot v^2, \text{ кН,}$$

Коэффициент сопротивления:

$$\zeta = \zeta_{тр} + \zeta_{ост} + \zeta_{выст} + \zeta_{аэро},$$

По данным испытаний для двухвинтовых судов  $\zeta_{аэро} = 0,01 \cdot 10^{-3}$ ,  $\zeta_{выст} = 0,044 \cdot 10^{-3}$ .

Коэффициент остаточного сопротивления для несамоходных и самоходных судов ССП с простыми обводами корпуса

$$\zeta_{ост} = \zeta'_{ост} \cdot \left[ \left( \frac{5 \cdot B}{L} \right)^{5/4} + \left( \frac{3 \cdot d}{B} \right)^{1/2} - 1 \right],$$

со сложными обводами корпуса

$$\zeta_{ост} = \zeta'_{ост} \cdot \left[ \left( \frac{5,5 \cdot B}{L} \right)^{5/4} + \left( \frac{4,5 \cdot d}{B} \right)^{1/2} - 1 \right],$$

где

$$\zeta'_{ост} = (\zeta'_{ост})_{0,80} + 10 \cdot \left[ (\zeta'_{ост})_{0,90} - (\zeta'_{ост})_{0,80} \right] \cdot (C_b - 0,80)$$

При  $Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} < 0,16$ :

$$(\zeta'_{ост})_{0,90} = 2,25 \cdot 10^{-3} + 10^{-2} \cdot (Fr - 0,10), \quad (\zeta'_{ост})_{0,80} = 1,0 \cdot 10^{-3} + 3,33 \cdot 10^{-3} \cdot (Fr - 0,10)$$

При  $Fr \geq 0,16$ :

$$(\zeta'_{ост})_{0,90} = 2,85 \cdot 10^{-3} + 3,83 \cdot 10^{-2} \cdot (Fr - 0,16), \quad (\zeta'_{ост})_{0,80} = 1,2 \cdot 10^{-3} + 1,17 \cdot 10^{-2} \cdot (Fr - 0,16).$$

Буксировочные мощности для составного судна (судна-толкача + баржа):

$$P_t^c = \sum P_{ti} \cdot C_z,$$

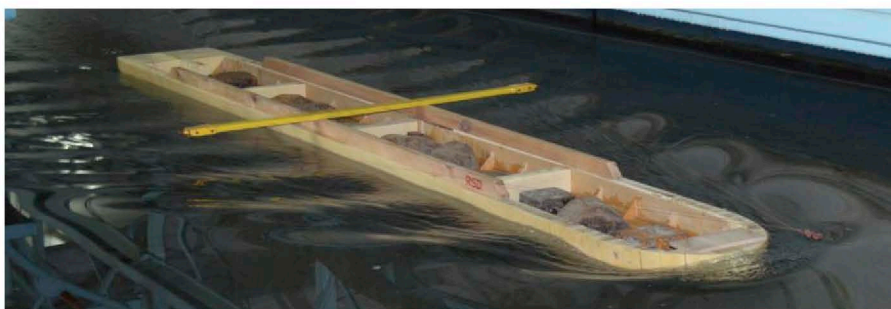
$N$  судна-толкача при скорости 10,0 уз можно определить по регрессионной зависимости

$$N/\Delta = 0,29 - 3,7 \cdot 10^{-6} LBD_1', \text{ кВт/т.}$$

Эксперимент: буксировка модели баржи RDB67 на глубокой воде,  $Fr = 0,165$



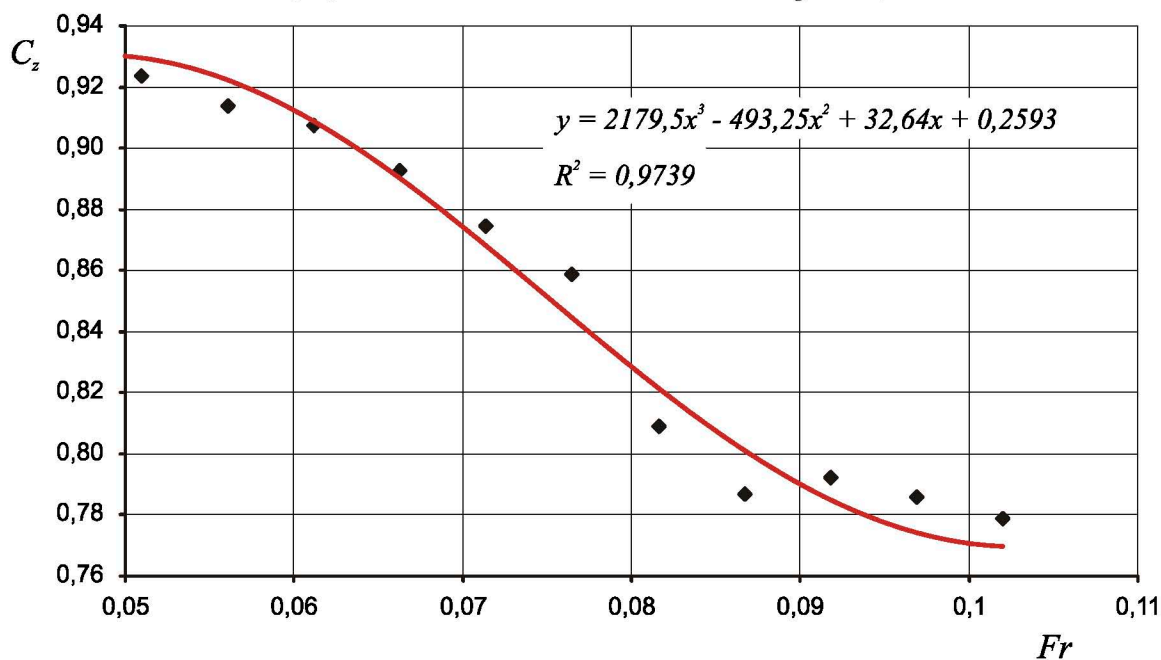
Эксперимент: Буксировка модели сухогруза-толкача RSD67 на глубокой воде,  $Fr = 0,146$



Эксперимент: Буксировка модели составного судна на глубокой воде,  $Fr = 0,099$



Коэффициент счала СС СП с  $C_b = 0,930$



# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ (ММФ). РАСЧЕТ ПРОВОЗОСПОСОБНОСТИ

## Расчет провозоспособности состава (модель «вертушка»)

Наименование показателя	Условные показатели	Ед. измер.	Расчетная формула
Средняя эксплуатационная скорость на пути	$v$	уз	$v \cdot K_{\text{реал}}$
Коэффициент морского запаса (ветер, волны и т.д.)	$K_{MZ}$	-	-
Удельная грузоподъемность судна море/река	$w_1/w_2$	м <sup>3</sup> /т	$(W/P_{\text{сп1}})/(W/P_{\text{сп2}})$
<b>Основная (летняя) навигация</b>			
Ходовое время в рейсе (суммарное, в обоих направлениях)	$t_1^1$	сут	$\frac{2 \cdot L^1 \cdot K_{MZ}}{24 \cdot v_E} + 2t_{\text{хон}}$
Коэффициент загрузки в прямом/обратном направлении	$K_{Z1}^1 / K_{Z2}^1$	-	$(\frac{w_1}{g_1}) \cdot z / (\frac{w_2}{g_2}) \cdot z$
Масса перевезенного за рейс груза в прямом/обратном направлении	$Q_1^1 / Q_2^1$	т	$P_{\text{сп2}} \cdot K_{Z1}^1 / P_{\text{сп1}} \cdot K_{Z2}^1$
Стояночное время состава за рейс в порту отправления	$t_{\text{ст1}}^1$	сут	$(Q_1^1/H_1) + (Q_2^1/H_2)$
Стояночное время состава за рейс в порту назначения / перевалочном пункте	$t_{\text{ст2}}^1$	сут	$\frac{Q_1^1}{H_4} + \frac{Q_2^1}{H_3}$ или $\frac{Q_2^1}{H_3}$ (при разгрузке на рейде)
Стояночное время состава за рейс на РПК	$t_{\text{ст3}}^1$	сут	$Q_1^1/H_4$
Время кругового рейса	$T_P^1$	сут	$(T_{P1}^1 + T_{P2}^1 + T_{P3}^1)/3$
Количество рейсов за период навигации	$n_P^1$	-	$T_E^1/T_P^1$
Масса перевезенного за рейс груза	$Q_P^1$	т	$Q_1^1 + Q_2^1$
Масса перевезенного за период навигации груза	$Q^1$	т	$Q_P^1 \cdot n_P^1$
Грузооборот судна за период навигации	$Q^1 L^1$	т-мили	$Q^1 \cdot L^1$
<b>Зимняя навигация</b>			
Ходовое время в рейсе	$t_1^2$	сут	$\frac{2 \cdot L^2 \cdot K_{MZ}}{24 \cdot v_E} + 2t_{\text{хон}}$
Коэффициент загрузки в прямом/обратном направлении	$K_{Z1}^2 / K_{Z2}^2$	-	$(\frac{w_1}{g_3}) \cdot z / (\frac{w_1}{g_4}) \cdot z$
Масса перевезенного за рейс груза в прямом/обратном направлении	$Q_1^2 / Q_2^2$	т	$P_{\text{сп1}} \cdot K_{Z1}^2 / P_{\text{сп2}} \cdot K_{Z2}^2$
Стояночное время состава за рейс в порту отправления	$t_{\text{ст1}}^2$	сут	$(Q_1^2/H_5) + (Q_2^2/H_6)$
Стояночное время состава за рейс в порту назначения	$t_{\text{ст2}}^2$	сут	$\frac{Q_1^2}{H_8} + \frac{Q_2^2}{H_7}$ или $\frac{Q_2^2}{H_7}$ (при разгрузке на рейде)
Стояночное время состава за рейс на РПК	$t_{\text{ст3}}^2$	сут	$Q_1^2/H_8$
Время кругового рейса	$T_P^2$	сут	(см. формулу на слайде 14)
Количество рейсов за период навигации	$n_P^2$	-	$T_E^2/T_P^2$
Масса перевезенного за рейс груза	$Q_P^2$	т	$Q_1^2 + Q_2^2$
Масса перевезенного за период навигации груза	$Q^2$	т	$Q_P^2 \cdot n_P^2$
Грузооборот судна за период навигации	$Q^2 L^2$	т-мили	$Q^2 \cdot L^2$
<b>Переход порожем</b>			
Ходовое время в рейсе	$t_1^3$	сут	$\frac{2 \cdot L^3 \cdot K_{MZ}}{24 \cdot v_E}$
Стояночное время баржи за рейс в порту отправления	$t_{\text{ст1}}^3$	сут	$t_{\text{дон}}^5$
Стояночное время баржи за рейс в порту назначения	$t_{\text{ст2}}^3$	сут	$t_{\text{дон}}^6$
Время кругового рейса	$T_P^3$	сут	$t_{\text{ст1}}^3 + t_{\text{ст2}}^3 + t_1^3$
Масса перевезенного за год груза	$Q$	т	$Q^1 + Q^2$
Грузооборот состава за год	$QL$	т-мили	$Q^1 \cdot L^1 + Q^2 \cdot L^2$

Коэффициент реализации с учетом волнения:

$$K_{реал} = 1 - \frac{\Delta v_{волн} \cdot k_{волн}}{100},$$

вероятность появления волн 3% обеспеченности 1 – 3 м на морском участке:

$$k_{волн} = 0,51 \cdot \frac{L_{мор}^1}{L_{мор}^1 + L_{реч}^1}, \text{ в летнюю навигацию, } L_{мор}^1 - \text{протяженность морского участка}$$

в летнюю навигацию, миль,  $L_{реч}^1$  – протяженность речного участка в летнюю навигацию, миль;  $k_{волн} = 0,53$  в зимнюю навигацию (для прибрежных линий, на основе статистики).

Потеря скорости (в % соотношении) оценена с использованием внешней структуры формулы проф. Квона с применением коэффициентов, полученных путем обработки статистических данных по морским рейсам ССП проектов RST22M, RST27 и др. с коэффициентами полноты  $C_b = 0,900 - 0,930$  в условиях волнения, характерного для ССП:

$$\Delta v_{волн} = BC \cdot \alpha \cdot \mu \cdot \frac{\Delta v}{v} 100\%,$$

$BC$  – поправочный коэффициент на «сверхполноту». Для ССП с  $C_b = 0,900 - 0,930$  в грузу для эксплуатационных скоростей  $4 < v < 10$  уз.

$$BC = 1,412 - 0,198v + 0,0239v^2,$$

$v \leq 4$  уз  $BC = 1$ ; в балласте для эксплуатационных скоростей  $7 < v < 10$  уз.

$$BC = 1,9207 - 0,2714v + 0,02v^2,$$

$v \leq 7$  уз  $BC = 1$ ;

$\alpha$  – коррекционный коэффициент Квона, учитывающий загрузку судна и базовый  $C_b$ . Например, для судов «Днепро-макс» класса

$$\text{в грузу: } \alpha = 3,1 - 18,7Fr + 28,0Fr^2, \text{ в балласте: } \alpha = 3,4 - 20,9Fr + 31,8Fr^2;$$

$\mu$  – коэффициент влияния направления волнения.

$\frac{\Delta v}{v} 100\%$  – потеря скорости на волнении (учитывает интенсивность волнения и объемное водоизмещение судна).

$$\text{В грузу: } \frac{\Delta v}{v} 100\% = 0,5 \cdot BN + \frac{BN^{6,5}}{2,7 \cdot \nabla^{2/3}}, \text{ в балласте: } \frac{\Delta v}{v} 100\% = 0,7 \cdot BN + \frac{BN^{6,1}}{2,7 \cdot \nabla^{2/3}}.$$

В соответствии с данными анализа ветро-волновой обстановки северо-западного района Черного моря потерю скорости  $\Delta v_{волн}$  можно оценивать при  $BN = 5$  – скорость ветра 8 – 10,7 м/с, высота волны 2 – 2,5 м.

## Определение времени кругового рейса

Для модели эксплуатации на основе «вертушки» для системы «буксир – баржа – баржа – баржа» для варианта летней навигации усредненное время условного кругового рейса  $T_P^1$  принято равным:

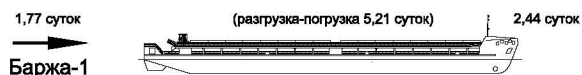
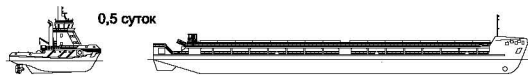
$$T_P^1 = \frac{T_{P1}^1 + T_{P2}^1 + T_{P3}^1}{3}, \text{ сут,}$$

где в числителе – время каждого условного кругового рейса одного цикла «вертушки» (включает в себя  $t_{дон}^1, t_{дон}^2$ ).

## Пример модели «вертушки» в летнюю навигацию с одним циклом

### Днепродзержинск

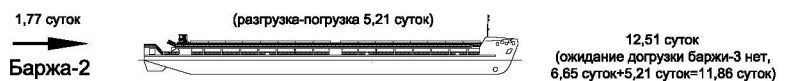
### Измаил



1) Условный круговой рейс (2,44+1,77=4,21 суток)



2) Условный круговой рейс (2,44+2,77=5,21 суток)



3) Условный круговой рейс (3,09+1,77=4,86 суток)



С целью получения более достоверного результата, например, для зимней навигации могут быть проанализированы 2 цикла «вертушки», тогда для варианта зимней навигации усредненное время условного кругового рейса  $T_P^2$  может быть оценено как:

$$T_P^2 = \frac{T_{P1}^2 + T_{P2}^2 + T_{P3}^2 + T_{P4}^2 + T_{P5}^2 + T_{P6}^2}{6}, \text{ сут,}$$

где в числителе – время каждого условного кругового рейса циклов «вертушки» (включает в себя  $t_{дон}^3, t_{дон}^4$ ).

Для модели эксплуатации «самоходное судно-толкач и одна баржа» для перевозки грузов из речных портов на РПК время кругового рейса:

1)  $T_p^i = t_{cm1}^i + t_{x1}^i + t_{cm2}^i$ , где  $t_{x1}^i$  – ходовое время на участке «порт отправления – перевалочный пункт» и обратно;

2)  $T_p^i = t_{cm1}^i + t_x^i + t_{cm3}^i + k \cdot t_{cm2}^i$ , где  $k$  – коэффициент влияния времени оставления баржи в перевалочном пункте (от 1 до 2. 1 – если временем можно пренебречь; 2 – время оставления близко к  $t_{cm2}^i$ );

3)  $T_p^i = t_{cm1}^i + t_x^i + t_{cm3}^i + t_{cm2}^i$ .

Для модели эксплуатации «буксир-толкач и баржа»:

1)  $T_p^i = t_{cm1}^i + t_x^i + t_{cm3}^i + t_{cm2}^i$  (выгрузка на рейде);

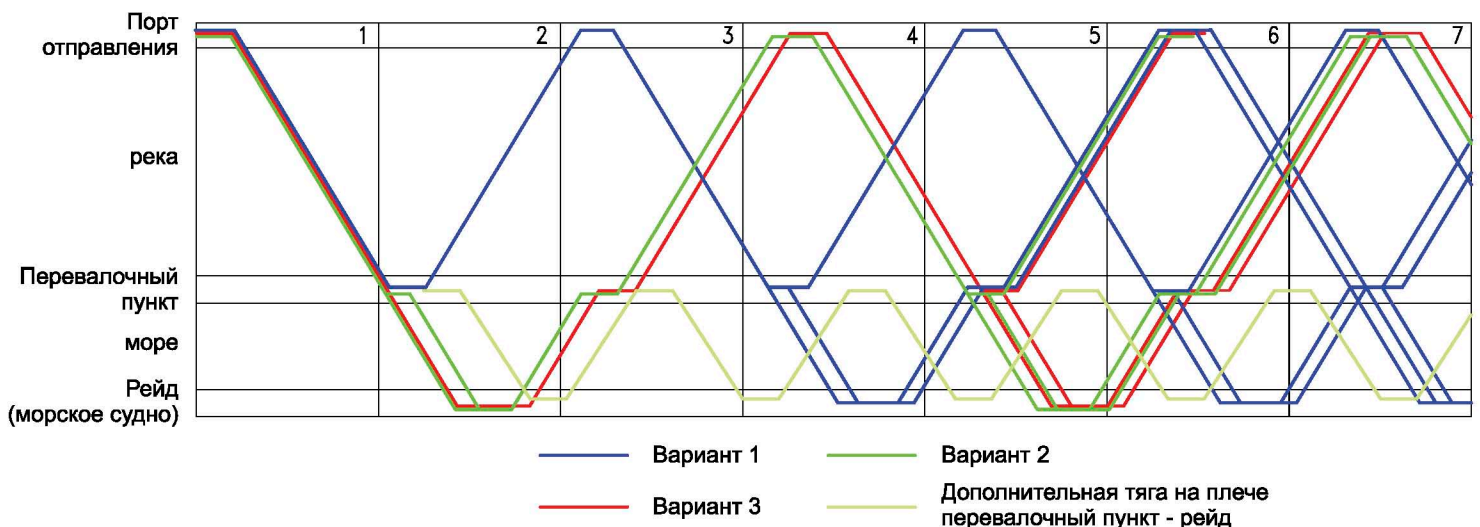
2)  $T_p^i = t_{cm1}^i + t_{x1}^i + t_{cm2}^i$  (выгрузка в перевалочном пункте, без «вертушки»),  
 $T_p^i = t_{cm1}^i + t_{x1}^i$  (с реализацией «вертушки»).

Для модели эксплуатации «буксир-толкач и две баржи»:

1)  $T_p^i = t_{cm1}^i + t_x^i + t_{cm3}^i + k \cdot t_{cm2}^i$  (частичная выгрузка на перевалочном пункте);

2)  $T_p^i = t_{cm1}^i + t_{x1}^i + t_{cm2}^i$  (выгрузка в перевалочном пункте, без «вертушки»).

### Пример модели эксплуатации самоходного судна-толкача с баржей в летнюю навигацию



При работе на РПК необходимо учитывать тот факт, что всегда присутствует ограничивающий фактор – максимальная грузоподъемность (партионность) морского судна-накопителя  $P_{sp}^{РПК}$ .

При расчете ходового времени  $t_x^1$  условного кругового рейса «вертушки» и кругового рейса по другим моделям эксплуатации  $T_{Pi}^1$  в летнюю навигацию учтены дополнительные простои состава:

$$t_{x\partial on} = \sum t_{x\partial on}^i$$

- при шлюзовании  $t_{x\partial on}^1$ ;
- при прохождении узкостей  $t_{x\partial on}^2$ ;
- при прохождении мостов (ожидание разводки мостов, если надводный габарит состава превышает подмостовой габарит)  $t_{x\partial on}^3$ ;
- при движении в ночное время  $t_{x\partial on}^4$  (на некоторых участках действуют ограничения);
- влияние погодных условий (на некоторых участках действуют ограничения при видимости менее 1 км, ветер и волны по прогнозу и по факту могут быть выше расчетных и т.п.)  $t_{x\partial on}^5$ .

При расчете ходового времени  $t_x^2$  условного кругового рейса «вертушки» и кругового рейса по другим моделям эксплуатации  $T_{Pi}^2$  в зимнюю навигацию учтены дополнительные простои состава из-за неблагоприятной погоды

$$t_{x\partial on} = t_{x\partial on}^6.$$

В соответствии с графиками повторяемости волнения в I районе Черного моря, при расчетной высоте волны  $h_{3\%} = 3$  м приняты:

- 10 дней простоя в зимнюю навигацию – повторяемость высот волн  $h_{3\%} > 3$  м составляет 12% ( $80 - 0,88 \cdot 80 = 10$  дней);
- 20 дней суммарного простоя в летнюю навигацию – повторяемость высот волн  $h_{3\%} > 3$  м на морском участке составляет 4% ( $260 - 0,96 \cdot 260 = 10$  дней) плюс 10 дней на простой на речном участке (волнение в водохранилищах, туманы, сильный ветер).



# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ (ММФ). ОЦЕНКА СТРОИТЕЛЬНОЙ СТОИМОСТИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ

Для учета строительной стоимости при разных  $C_b$  введена поправка:

$$\Delta S = (\Delta_{nop}^{C_{bosn}} - \Delta_{nop}^{C_{brasch}}) \cdot (\Delta S_1 + \Delta S_2),$$

где  $\Delta_{nop}^{C_{bosn}}$  – водоизмещение порожнем при основном коэффициенте полноты, т;  $\Delta_{nop}^{C_{brasch}}$  – водоизмещение порожнем при расчетном коэффициенте полноты, т;  $\Delta S_1$  – средняя стоимость судостроительной стали, \$/т;  $\Delta S_2$  – средняя стоимость работ по сборке корпуса, \$/т.

$\Delta S_2 = S_2 \cdot Tr_{корп}$ , где  $S_2$  – стоимость 1 чел-ч/т, \$;  $Tr_{корп}$  – удельная трудоемкость по сборке корпуса, чел-ч/т.

## Определение эксплуатационных расходов

При оценке расходов учтены данные судоходной / судоходных компаний, оперирующих судами смешанного плавания.

Общие годовые эксплуатационные расходы:

$$R^{общ} = \sum R_i.$$

Расчет эксплуатационных расходов включает в себя следующие статьи расходов для всех судов состава:

- расходы на содержание экипажа  $R_1$  (зарплата  $R_{11}$ , расходы на продовольствие  $R_{12}$ , дополнительные  $R_{13}$  – репатриация, транспортные и т.д.);
- отчисления на социальные мероприятия:  $R_2 = k_{соц} \cdot R_{11}$ , где  $k_{соц} = 37,33\%$ ;
- расходы на ремонт:  $R_3 = k_{рем} \cdot 365$ , где  $k_{рем}$  – суточные расходы на ремонт;
- расходы на снабжение  $R_4$  (инвентарь, пресная вода, масло, техническое обслуживание механизмов во время рейса, бытовые товары и т.д.).  $R_4 = k_{снаб} \cdot 365$ , где  $k_{снаб}$  – суточные расходы на ремонт;
- расходы на страхование  $R_5$  (имущества, от убытков, корпуса и механизмов).  $R_5 = k_{стр} \cdot 365$ , где  $k_{стр}$  – суточные расходы на страхование;
- портовые сборы в национальных и иностранных портах (если планируется), сборы за шлюзование, разводку мостов, разрешения для захода в речные порты для судов под иностранным флагом (если планируется)  $R_6$  (корабельный, причальный, канальный, маячный, якорный, санитарный, за услуги Поста регулирования движения судов, административный, швартовый, за работу буксиров при швартовке/отшвартовке, за лоцманскую проводку);
- расходы на топливо  $R_7$ ;
- административно-управленческие и общеэксплуатационные расходы:  $R_8 = k_{адм} \cdot 365$ , где  $k_{адм}$  – суточные расходы на управление;
- прочие расходы:  $R_9 = k_{проч} \cdot 365$ , где  $k_{проч}$  – суточные прочие расходы.

Для учета рисков, связанных с фактором времени, определяют настоящую стоимость будущих денежных потоков:

$$\tilde{P}_t^d = d_t \cdot \tilde{P}_t,$$

где  $\tilde{P}_t^d$  – дисконтированный денежный поток в году  $t$ ;  $d_t$  – коэффициент дисконтирования в году  $t$ .

### ОСНОВНОЙ КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

В качестве целевой функции оптимизационной задачи оценки экономической эффективности состава или составного судна принят дисконтированный срок окупаемости проекта  $T_O$ . Критерием эффективности

$$T_O(C_b; V_S) = \min$$

является минимальный срок окупаемости при вариациях коэффициента общей полноты  $C_b$  и эксплуатационных скоростей  $V_S$  в рассматриваемых диапазонах значений этих независимых переменных, характерных для судов «Днепро-макс» класса, где  $C_b \leq 0,950$  (на осадку 3,2 – 3,6 м в реке),  $v = 5 – 12$  уз для отечественных ССП.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Продуктивность труда экипажа состава или составного судна:

$\Pi_{np} = D/n_{эк}$ ; продуктивность 1 т грузоподъемности за сутки эксплуатации в период летней навигации:  $\Pi_{1л}^1 = \frac{Q^1 \cdot L^1}{P_{эп2} \cdot T_E^1}$ , т-мили/тнж-сут; продуктивность 1 т

грузоподъемности за сутки эксплуатации в период зимней навигации:  $\Pi_{1з}^2 = \frac{Q^2 \cdot L^2}{P_{эп1} \cdot T_E^2}$ , т-

мили/тнж-сут; фондоотдача:  $F = D/K$ ; себестоимость перевозки 1 т груза:  $C = R^{общ}/Q$ ;

себестоимость 1 т-мили:  $C_{мп} = \frac{R^{общ}}{Q \cdot L}$ ; прибыль за эксплуатационный период:

$P = D - R^{общ}$ ; прибыль за жизненный цикл:  $\pi_{жц} = P \cdot t_{жц}$ , где  $t_{жц}$  – расчетный срок работы судна (чаще всего, 24 года).

# ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ, ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ

## Сопоставление расчетных данных с реальными судами

Характеристики	Расчет	Реальный объект (пр. RST27)		Реальный объект (пр. RSD44)		Реальный объект (пр. 004ROB05)	
		Расчет	Реальный объект	Расчет	Реальный объект	Расчет	Реальный объект
Класс судна	R2	R2	М-ПР	М-ПР	R3-RSN	R3-RSN	
Водоизмещение море, т	9318	9483	7754	7566	5116	5171	
Водоизмещение река, т	7759	7881	7575	7393	4991	5045	
Длина расчетная, м	137,60	137,10	138,92	138,90	92,03	92,58	
Ширина расчетная, м	16,7	16,7	16,5	16,5	16,5	16,5	
Высота борта, м	6,24	6,0	5,48	5,0	4,716	5,0	
Осадка в море, м	4,2	4,2	3,595	3,595	3,6	3,6	
Осадка в реке, м	3,6	3,6	3,6	3,67	3,6	3,6	
Коэффициент общей полноты	0,930	0,930	0,918	0,918	0,913	0,913	
Водоизмещение порожнем, т	2483	2453	1915	1863	949	846,5	
Дедвейт в море, т	6835	7030	5986	5703	4167	4324	
Дедвейт в реке, т	5276	5428	5804	5530	4042	4198	
Скорость, уз	10,5	10,5	10,0	10,0	9,0*	9,0	
Буксировочное сопротивление, кН	137,08	138,21	110,71	108,0	85,9	90,2	
Буксировочная мощность, кВт	740	746	569	555	397	417	
Номинальная мощность, кВт	1706	1758	1298	1266	-	-	

\* – скорость толкания баржи

## Погрешности базовых показателей

Показатель	Погрешность, %		
	минимальная	максимальная	среднеквадратичная
<b>Самоходное сухогрузное судно смешанного плавания</b>			
Вес металлического корпуса, т	0,02	0,9	0,32
Вес статей нагрузки (без металла), т	1,09	1,47	1,25
К-т остаточного сопротивления	-	-	8,6
<b>Несамоходное сухогрузное судно смешанного плавания (трюмная баржа)</b>			
Вес металлического корпуса, т	0,02	1,3	0,72
Вес статей нагрузки (без металла), т	0,92	6,7	4,9
К-т остаточного сопротивления	-	-	7,4

## Результаты расчета с учетом погрешностей

Дедвейт (на речную осадку), т	Характеристики	Значение без погрешности	Допустимое значение				Значение характеристики с учетом возможной погрешности					
			среднеквадратичная погрешность		максимально допустимая погрешность		вес металла		вес иных статей нагрузки		к-т остаточного сопротивления	
			«+»*	«-»**	«+»	«-»	«+»	«-»	«+»	«-»	«+»	«-»
<b>Самоходное сухогрузное судно смешанного плавания</b>												
3000	$P_t$ , кВт	506	526,2	485,8	531,8	480,2	505,5	506	504,5	507	530	482
	$\Delta_{\text{лод}}$ , т	1134	1179,4	1088,6	1191,8	1076,2	1138	1131	1148	1120	1134	1134
	$\Delta$ , т	4172	4338,9	4005,1	4384,8	3959,2	4178	4168	4192	4153	4172	4172
4000	$P_t$ , кВт	530	551,2	508,8	557,0	503,0	530	530	530	529,5	551	508,5
	$\Delta_{\text{лод}}$ , т	1516	1576,6	1455,4	1593,3	1438,7	1521	1512	1535	1498	1516	1516
	$\Delta$ , т	5578	5801,1	5354,9	5862,5	5293,5	5586	5572	5606	5554	5578	5578
5000	$P_t$ , кВт	572	594,9	549,1	601,2	542,8	572	572	572,5	572	592	552
	$\Delta_{\text{лод}}$ , т	1888	1963,5	1812,5	1984,3	1791,7	1894	1882	1912	1865	1888	1888
	$\Delta$ , т	6947	7224,9	6669,1	7301,3	6592,7	6955	6939	6980	6915	6947	6947
6000	$P_t$ , кВт	607	631,3	582,7	638,0	576,0	607	607	607	606,5	625	588
	$\Delta_{\text{лод}}$ , т	2240	2329,6	2150,4	2354,2	2125,8	2248	2234	2269	2213	2240	2240
	$\Delta$ , т	8243	8572,7	7913,3	8663,4	7822,6	8253	8233	8282	8205	8243	8243
<b>Несамоходное сухогрузное судно смешанного плавания (трюмная баржа)</b>												
3000	$P_t$ , кВт	513	533,5	492,5	539,2	486,8	513	514	509	517	535	492
	$\Delta_{\text{лод}}$ , т	1048	1089,9	1006,1	1101,4	994,6	1056	1041	1100	997	1048	1048
	$\Delta$ , т	4055	4217,2	3892,8	4261,8	3848,2	4062	4046	4112	3997	4055	4055
4000	$P_t$ , кВт	537	558,5	515,5	564,4	509,6	537	538	535	540	557,5	517
	$\Delta_{\text{лод}}$ , т	1135	1180,4	1089,6	1192,9	1077,1	1144	1127	1191	1080	1135	1135
	$\Delta$ , т	5153	5359,1	4946,9	5415,8	4890,2	5162	5145	5212	5094	5153	5153
5000	$P_t$ , кВт	570	592,8	547,2	599,1	540,9	570	570	569	570	589	550
	$\Delta_{\text{лод}}$ , т	1184	1231,4	1136,6	1244,4	1123,6	1193	1176	1242	1126	1184	1184
	$\Delta$ , т	6199	6447,0	5951,0	6515,1	5882,9	6208	6191	6260	6139	6199	6199
6000	$P_t$ , кВт	600	624,0	576,0	630,6	569,4	600	600	601	600	619	581
	$\Delta_{\text{лод}}$ , т	1221	1269,8	1172,2	1283,3	1158,7	1230	1212	1281	1161	1221	1221
	$\Delta$ , т	7238	7527,5	6948,5	7607,1	6868,9	7248	7229	7301	7177	7238	7238

\* «+» – положительная погрешность; \*\* «-» – отрицательная погрешность

## Результаты сравнения срока окупаемости $T_0$ с учетом изменения цен на топливо

Схема расчета	Цена на топливо $C_m$ , \$/т				
	-10% – 450	-5% – 475	Базовая – 500	+5% – 525	+10% – 550
ББС «Днепро-макс» класса. Модель «вертушка»	7,69	7,79	7,90	8,01	8,12
ББС «Днепро-макс» класса. Модель «самоходное судно»	8,20	8,29	8,39	8,49	8,60
Составное судно «Днепро-макс» класса (речной порт – РПК)	6,16	6,20	6,23	6,27	6,31

\* для каждой схемы принят оптимальный вариант, имеющий минимальный срок окупаемости ( $C_b = 0,93$ ,  $V_s = 9,5$  уз)

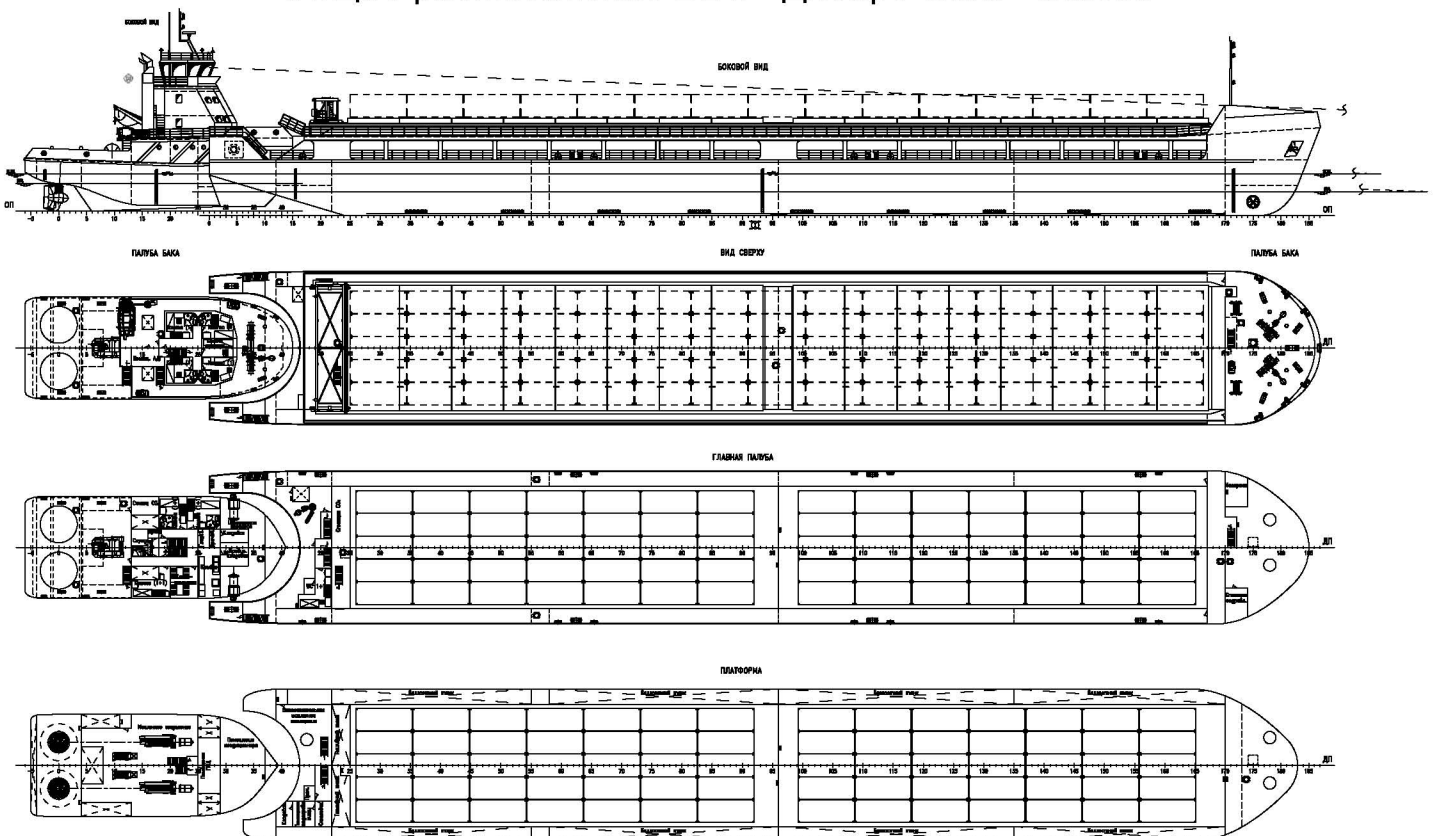
# РЕЗУЛЬТАТ ОПТИМИЗАЦИИ. БЭС, РАБОТАЮЩИЙ ПО МОДЕЛИ «ВЕРТУШКА» И «САМОХОДНОЕ СУДНО» НА ЛИНИИ «ДНЕПР – ЧЕРНОЕ МОРЕ – УКРАИНСКИЕ ДУНАЙСКИЕ ПОРТЫ»

20

## Основные характеристики БЭС

Данные	Барже-буксирный состав «Днепро-макс» класса		
	буксир	баржа	состав
Ориентировочный класс судна	М-ПР	О-ПР	
Длина наибольшая, м	29,60	121,50	148,90
Длина между перпендикулярами, м	23,65	120,20	-
Ширина габаритная, м	11,80	17,20	-
Ширина, м	11,00	17,00	-
Высота борта, м	5,10	5,50	-
Коэффициент общей полноты (в реке $T = 3,2$ м)		0,930	
Коэффициент общей полноты (в море $T = 4,2$ м)		0,937	
Осадка по ЛГВЛ $d_M$ в море / $d_P$ в реке, м	4,20 / 3,20		
Грузоподъемность $P_{гр}$ , т			
при $d_P$ (река)	4876		
при $d_M$ (море)	7038		
Скорость, уз при % от МДМ	около 10,0 (85%) (в составе) около 12,0 (85%) (без состава)		
Объем грузовых трюмов, м <sup>3</sup>	9170		
Количество грузовых трюмов	2		
Мощность ГД	2 x 1200 кВт		
Экипаж $n_{ЭК}$ / чел, мест	10 чел. / 12 мест		

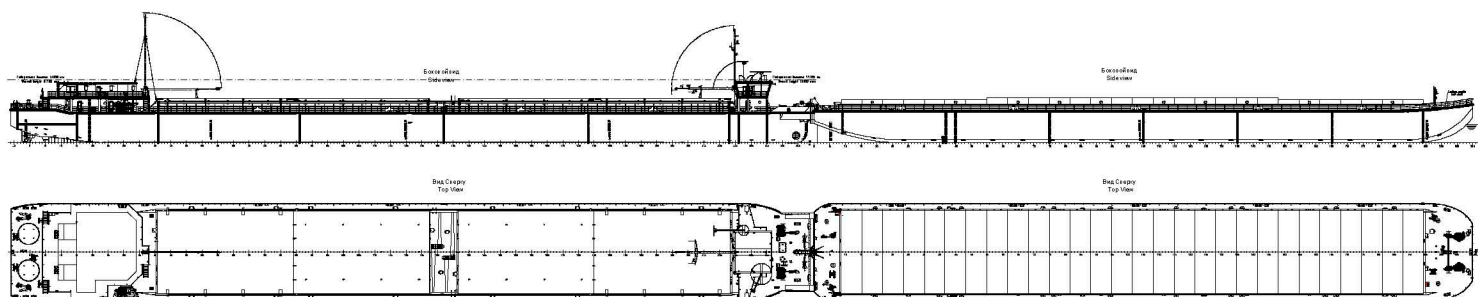
## Общее расположение БЭС «Днепро-макс» класса



## Основные характеристики составного судна

Данные	Составное судно «Днепро-макс» класса		
	судно-толкач	баржа	состав
Ориентировочный класс судна	М-ПР	О-ПР	
Длина наибольшая, м	141,00	121,50	262,50
Длина между перпендикулярами, м	138,91	120,20	-
Ширина габаритная, м	17,20	17,20	-
Ширина, м	17,00	17,00	-
Высота борта, м	6,00	5,50	-
Коэффициент общей полноты (в реке $T = 3,2$ м)	0,930	0,930	
Коэффициент общей полноты (в море $T = 4,2$ м)	0,937	0,937	
Осадка по ЛГВЛ $d_M$ в море / $d_P$ в реке, м	4,20 / 3,20		
Дедвейт $dwt$ , т			
при $d_P$ (река)	4879	4876	9755
при $d_M$ (море)	7376	7038	14414
Скорость, уз при % от МДМ	около 10,0 (100%) (в составе), около 10,5 (85%) (без состава)		
Объем грузовых трюмов, м <sup>3</sup>	8715	9170	17885
Количество грузовых трюмов	4	6	10
Мощность ГД	2 × 1200 кВт		
Экипаж $n_{ЭК}$ / чел, мест	10 чел. / 12 мест		

## Общее расположение составного судна «Днепро-макс» класса проекта RSD67+RDB67

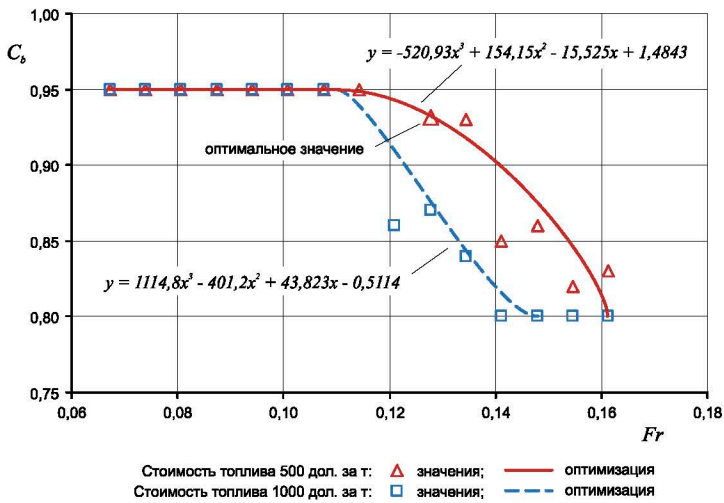


## Общий вид составного судна «Днепро-макс» класса проекта RSD67+RDB67



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО $C_b$ ИССЛЕДУЕМЫХ ВАРИАНТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧИСЛА ФРУДА $Fr$

## Перспективный ББС, работающий по модели «вертушка» и «самоходное судно»



При стоимости на судовое топливо MGO 500 \$/т

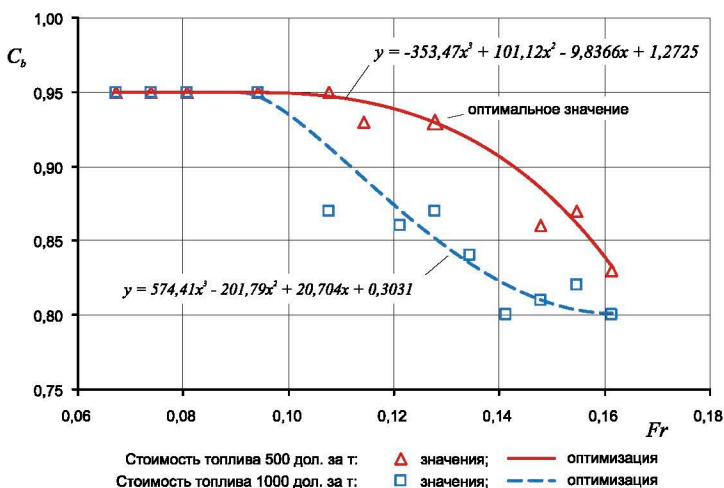
$$C_b^{opt} = 0,950, \text{ для } Fr > 0,11:$$

$$C_b^{opt} = 1,484 - 15,53Fr + 154,2Fr^2 - 520,9Fr^3$$

При стоимости на судовое топливо MGO 1000 \$/т

$$C_b^{opt} = 0,950, \text{ для } 0,11 < Fr \leq 0,15:$$

$$C_b^{opt} = (43,82 - 401,2Fr + 1114,8Fr^2)Fr - 0,511$$



При стоимости на судовое топливо MGO 500 \$/т

$$C_b^{opt} = 0,950, \text{ для } Fr > 0,09:$$

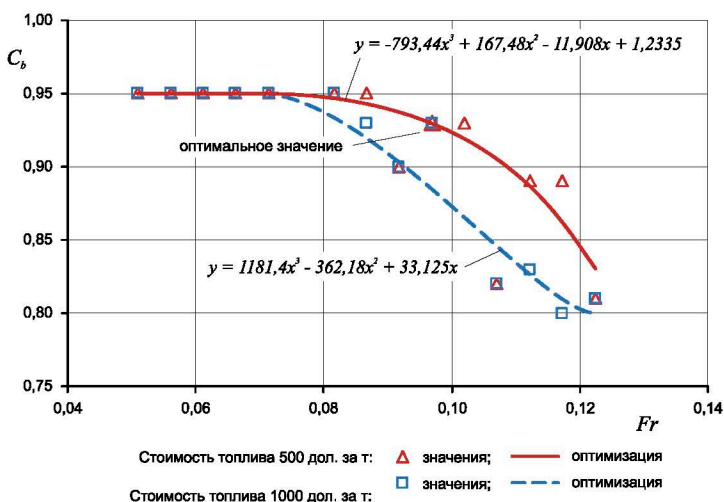
$$C_b^{opt} = 1,273 - 9,84Fr + 101,1Fr^2 - 353,5Fr^3$$

При стоимости на судовое топливо MGO 1000 \$/т

$$C_b^{opt} = 0,950, \text{ для } Fr > 0,09:$$

$$C_b^{opt} = 0,303 + 20,70Fr - 201,8Fr^2 + 574,4Fr^3$$

## Перспективное СС с возможностью эксплуатации в Черном море (работа на РПК)



При стоимости на судовое топливо MGO 500 \$/т

$$C_b^{opt} = 0,950, \text{ для } Fr > 0,07:$$

$$C_b^{opt} = 1,234 - 11,91Fr + 167,5Fr^2 - 793,4Fr^3$$

При стоимости на судовое топливо MGO 1000 \$/т

$$C_b^{opt} = 0,950, \text{ для } Fr > 0,07:$$

$$C_b^{opt} = 33,13Fr - 362,2Fr^2 + 1181,4Fr^3$$

Для существующих реалий речных и смешанных река-море перевозок массовых партий груза оптимальным является судно с максимально возможным для определенного диапазона скоростей коэффициентом полноты  $C_b$ . Для диапазона скоростей 8,5 – 10 уз (основной диапазон работы существующих ССП) оптимальным является  $C_b = 0,930$ , при больших значениях резко вырастает буксировочное сопротивление, а, соответственно, и расходы на топливо, при меньших значениях – перевозится меньше груза и, соответственно, хуже экономика при таких же портовых и различных навигационных (шлюзование, проход под мостами) сборах, расходах на экипаж.

Таким образом, для судов «Днепро-макс» класса рекомендуется применять значение коэффициента общей полноты  $C_b = 0,930$  на речную осадку до 3,6 м при стандартных эксплуатационных скоростях на реке 8,5 – 10 уз. Рекомендации подтверждаются теоретическими обоснованиями и успешной практической эксплуатацией 35 танкеров и комбинированных судов (НЕ СОСТАВНЫХ) «Волго-Дон макс» класса проектов RST27 и RST54, и имеющих близкие к судам «Днепро-макс» класса характеристики.

Наиболее реализуемым выглядит концепт СОСТАВНОГО судна «Днепро-макс» класса, так как реализация «вертушки» барже-буксирного состава, требует гарантированных, постоянных грузопотоков с развитой логистической цепочкой, что в настоящее время проблематично.

Существующее составное судно, состоящее из самоходного судна-толкача проекта 19620 и баржи проекта 90035, имеет общую грузоподъемность в реке на осадку 3,2 м порядка 4000 т. Обоснованный в диссертации концепт «сверхполного» составного судна «Днепро-макс» класса перевозит на осадку 3,2 м около 9700 т, то есть в 2,4 раза больше за каждый рейс.

## Теоретическое значение и научная новизна полученных результатов

На основе применения методов коррекционно-регрессионного анализа и специально поставленного авторского эксперимента существенно усовершенствована математическая модель инженерных и навигационных свойств ББС и СС для использования в речной и морской воднотранспортной системах Украины, которая связывает эти свойства с искомыми оптимальными главными размерениями и основными характеристиками рассматриваемых объектов. Впервые получен коэффициент счала самоходного судна-толкача и баржи «Днепро-макс» класса с коэффициентом общей полноты  $C_b = 0,930$  при их совместной эксплуатации путем проведения модельных испытаний в опытовом бассейне. Также впервые получены зависимости для постатейного определения весовой нагрузки несамоходных и самоходных ССП с коэффициентом общей полноты  $C_b > 0,900$ . Усовершенствованы регрессионные зависимости для проектирования корпусов грузовых самоходных ССП нового поколения, для определения мощности главных двигателей самоходных судов, удельной грузоемкости сухогрузных судов. По результатам модельных испытаний и опыта эксплуатации самоходных ССП с  $C_b = 0,930$  получила дальнейшее развитие методика определения буксировочного сопротивления и буксировочной мощности ББС и СС СП.

В результате анализа структуры водных путей, погодных условий эксплуатации судов на этих водных путях и применения методов моделирования детерминированных воднотранспортных операций впервые разработана математическая модель функционирования ББС и СС СП, которая обеспечивает определение показателей эффективности их эксплуатации, формирует тривиальные и функциональные ограничения оптимизационной задачи. Получены формулы для определения времени кругового рейса для различных моделей эксплуатации ББС и СС СП. Усовершенствованы зависимости для определения потери скорости на морском участке для ССП с большой полнотой. В результате обработки данных по ветро-волновой обстановке северо-западного района Черного моря получены вероятности появления волн 3% обеспеченности высотой от 1 до 3 м на морском участке в летнюю и зимнюю навигации, которые учитывались при определении коэффициента реализации скорости рассматриваемых составов. Путем обработки статистических данных по расходам судоходных компаний, оперирующих флотом ССП, получены усовершенствованные зависимости для составляющих эксплуатационных расходов.

Впервые оптимизационная задача, результатом решения которой явилось теоретическое обоснование оптимальных характеристик ББС и СС СП, сведена к нахождению минимального срока окупаемости при вариациях коэффициента общей полноты и реальных эксплуатационных скоростей ББС и СС СП.

## Практическое значение полученных результатов

Создана база данных самоходных и несамоходных ССП, отражающая их современное состояние по инженерным и мореходным качествам, таким как вместимость, плавучесть, прочность, остойчивость, непотопляемость, ходкость, управляемость и мореходность.

Определены основные опасности эксплуатации СВП и ССП, включая ББС и СС, и частота их возникновения, позволяющие судовладельцам, проектантам и надзорным органам обращать внимание на наиболее актуальные проблемы эксплуатации исследуемых судов.

Разработан программный комплекс «Днепро-макс», позволяющий определять оптимальные значения главных размерений и характеристик ББС и СС СП.