

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГРУЗОВЫХ СУДОВ  
СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ

Предотвращение загрязнения окружающей среды всегда было в числе приоритетов Международной морской организации (ИМО). В 2000 г. в международную конвенцию МАРПОЛ добавлено Приложение VI "Правила предотвращения загрязнения атмосферы с судов", в котором содержатся требования, ограничивающие выбросы  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , летучих органических соединений и пр. При этом долгое время оставался открытым вопрос, как ограничить выбросы углекислого газа, который является одним из парниковых газов (в 2007 г. доля выбросов  $\text{CO}_2$  от мирового судоходства составляла 3,3 % от всех мировых выбросов [1]). По прогнозам к 2050 г. выбросы  $\text{CO}_2$  могут увеличиться в 3 – 5 раз.

Суть в том, что выбросы  $\text{CO}_2$  не удаётся регулировать путём изменения условий сгорания топлива в цилиндрах дизеля, как это делается, например, для уменьшения выбросов  $\text{NO}_x$ . Не эффективна и предварительная очистка топлива, как это делается для уменьшения выбросов  $\text{SO}_x$ . При сжигании топлива выбрасывается определённое количество  $\text{CO}_2$ , которое является постоянным для каждого типа топлива. Понятно, что судам для работы необходимо сжигать топливо. При этом меньше загрязнять атмосферу будет то судно, которое для выполнения той же транспортной работы сжигает меньше топлива, т.е. обладает большей энергетической эффективностью. Последнюю было решено оценить при помощи специально введенного конструктивного коэффициента энергоэффективности (ККЭЭ) – Energy Efficiency Design Index (EEDI).

1 июля 2012 г. были приняты поправки к Приложению VI к МАРПОЛ относительно правил предотвращения загрязнения воздушной среды с судов (MEPC.203(62)): добавлена новая глава 4 "Правила энергоэффективности для судов". Согласно этим правилам для каждого нового судна вычисляется достижимый ККЭЭ ("Attained EEDI"). Он должен быть меньше либо равен требуемому ККЭЭ ("Required EEDI"). Требуемый ККЭЭ вычисляется в зависимости от типа судна и дедвейта с учётом редуцированного коэффициента, который постепенно ужесточается вплоть до 2025 г. [7].

Достижимый ККЭЭ необходимо вычислять для судна, контракт на постройку которого заключён 1 января 2013 г., или киль которого за-

ложен 1 июля 2013 г., или поставка которого осуществляется 1 июля 2015 г. или после этих дат соответственно. Для судов средних размеров ККЭЭ, к которым относятся и суда смешанного плавания (ССП), например, для танкеров дедвейтом от 4000 до 20000 т и для судов для перевозки генеральных грузов дедвейтом от 3000 до 15000 т будет применяться с 1 января 2015 г. Достижимый ККЭЭ вычисляется в соответствии с методикой, приведённой в резолюции МЕРС.212(63) [17].

Анализ ККЭЭ активно осуществляется с 2005 г.: выполнены детальные исследования по навалочным судам, танкерам, газовозам, контейнеровозам, буксирам [8, 9, 11, 13, 14, 19].

Классификационные общества уже начали внедрять требования по энергоэффективности в свои правила [1, 10, 18], хотя как отмечается в [6], в отечественном судостроении внимание этому вопросу уделяется явно недостаточно.

Принципиально важным для отечественных судовладельцев является анализ ККЭЭ для грузовых ССП. Наиболее востребованными были и остаются суда класса "Волго-Дон макс", отвечающие габаритам Волго-Донского судоходного канала и предназначенные для замены известных советских серий "Волгонетей" и "Волго-Донов". Ожидается постройка ещё примерно 180 – 190 нефтеналивных и сухогрузных судов класса "Волго-Дон макс" нового поколения (проекты RST22M, RST25, RST27, RSD17, RSD19, RSD49). Как известно, практически все эти ССП, построенные в XXI веке для российских внутренних водных путей, имеют коэффициент общей полноты около 0,90, а проект RST27 – рекордные 0,93 [2, 5].

Остается открытым вопрос, насколько эти суда будут соответствовать вновь вводимым требованиям МАРПОЛ по энергоэффективности. Цель настоящей статьи – анализ энергоэффективности ССП нового поколения и выполнения в этих проектах перспективных требований по ККЭЭ.

ККЭЭ согласно [12], г/(т·миля)

$$EEDI = \frac{P \cdot SFC \cdot C_F}{Capacity \cdot V},$$

где  $P$  – мощность главного двигателя (ГД), кВт;  $SFC$  – удельный расход топлива, г/(кВт·ч);  $C_F$  – коэффициент выбросов  $CO_2$ ,  $T_{CO_2} / T_{топлива}$  (см. табл. 1 [12]);  $Capacity$  – дедвейт для грузовых судов или валовая вместимость, для пассажирских судов), т;  $V$  – скорость судна, узлы. Числитель в этой формуле представляет собой выбросы  $CO_2$ , г, а знаменатель – транспортную работу, т·миля.

Расчёт достижимого ККЭЭ строго регламентирован. Основное

влияние на результат оказывают следующие исходные данные: скорость судна, дедвейт, мощность ГД и удельный расход топлива ГД. Также учитывается расход топлива на дизель-генераторы (мощность которых принимается в размере 5 % от мощности ГД), наличие валогенератора и ледовых усилений, применение инновационных технологий повышения энергетической эффективности, кубическая вместимость для химовозов и газовозов и пр.

Дедвейт и скорость должны определяться при осадке по летнюю грузовую ватерлинию (ЛГВЛ) в воде плотностью 1025 кг/м<sup>3</sup>. Скорость и удельный расход топлива должны определяться при 75 % максимальной длительной мощности (МДМ) ГД.

Таблица 1

Данные по выбросам CO<sub>2</sub>

Тип топлива	Марка топлива	Содержание углерода	$C_F$
Дизельное/газойль	DMX - DMB по ISO 8217	0,8744	3,206
Легкое жидкое топливо (мазут флотский)	RMA - RMD по ISO 8217	0,8594	3,151
Тяжёлое жидкое топливо	RME - RMK по ISO 8217	0,8493	3,114
Сжиженный нефтяной газ (LPG)	Пропан	0,8182	3,000
	Бутан	0,8264	3,030
Сжиженный природный газ (LNG)	–	0,7500	2,750

Согласно резолюции МЕРС.214(63) [16] освидетельствование и сертификация ККЭЭ должна осуществляться в два этапа.

1. Предварительная проверка на стадии проектирования – представляются расчёт достижимого ККЭЭ и техническая документация, содержащая информацию, необходимую для вычисления достижимого ККЭЭ. В составе этой документации должна быть диаграмма зависимости скорости судна от мощности ГД при осадке по ЛГВЛ. При этом для судов, к которым применяется правило 21 Приложения VI к МАРПОЛ (т.е. необходимо вычислять требуемый ККЭЭ), диаграмма скорости судна должна основываться на надёжных результатах модельных испытаний. Модельные испытания в данном случае означают буксировочные испытания, самоходные испытания и испытания гребного винта в свободной воде и проводятся в присутствии представи-

теля Администрации.

Численные расчёты могут быть применены вместо испытаний гребного винта в свободной воде.

2. Окончательная проверка на ходовых испытаниях. При этом мощность ГД должна определяться торсиомером на валу или методом, рекомендованным производителем ГД и одобренным Администрацией. Другие методы могут быть применены при условии согласия судовладельца, судостроителя и Администрации.

По результатам измерения скорости и мощности должна быть построена диаграмма зависимости скорости судна от мощности ГД. Если она отличается от диаграммы скорости судна, полученной на стадии проектирования судна, то достижимый ККЭЭ должен быть пересчитан. Также при пересчёте должен быть учтён реальный дедевейт, если он отличается от проектного.

Чтобы выяснить, насколько новые проекты ССП соответствует требованиям по ККЭЭ, вычислим для них ККЭЭ.

Согласно правилу 21 Приложения VI к МАРПОЛ должно выполняться:

$$\text{Достижимый РПЭЭ} \leq \text{Требуемый РПЭЭ} = (1 - X/100) \cdot a \cdot b^{-c},$$

где  $X$  – редуцированный коэффициент, указанный в табл. 1 правила 21;  $a, b, c$  – параметры, приведённые в табл. 2 правила 21.

Достижимый ККЭЭ вычисляется по формуле (п. 2 МЕРС.212(63)):

$$\frac{\left( \prod_{j=1}^n f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot \text{Capacity} \cdot f_w \cdot V_{ref}} + \frac{\left( \prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{nP_{TI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}{f_i \cdot f_c \cdot \text{Capacity} \cdot f_w \cdot V_{ref}} - \frac{\left( \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot \text{Capacity} \cdot f_w \cdot V_{ref}},$$

где  $C_F$  – коэффициент преобразования между расходом топлива двигателя, г, и выбросами  $\text{CO}_2$ , г, принимаемый по табл. 1, индексы  $ME$  и  $AE$  относятся к главным и вспомогательным двигателям соответственно;  $V_{ref}$  – скорость судна на глубокой воде, при максимальной проектной осадке, мощности на валу

$$P = \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)}$$

и при спокойной погоде без ветра и волнения, узлы;  $\text{Capacity}$  – для танкеров и судов для перевозки генеральных грузов это дедевейт

( $dwt$ ), т;  $P_{ME}$  – мощность ГД, кВт,  $P_{ME} = 0,75(MCR_{ME} - P_{PTOmad})$ , кВт;  $MCR_{ME}$  – максимальная длительная мощность ГД, кВт;  $n_{ME}$  – количество ГД;  $P_{PTO}$  – мощность валогенератора, кВт,  $P_{PTO} = 0,75P_{PTOnom}$ , кВт;  $P_{PTOnom}$  – номинальная мощность валогенератора, кВт;  $P_{PTOmad}$  – максимально допустимое вычитание мощности ГД, принимаемое равным меньшему из  $P_{PTO}$  и  $P_{AE}$ , кВт;  $P_{PTI}$  – мощность ГД на валу, кВт;  $P_{eff}$  – выходная мощность инновационной механической энергоэффективной технологии для приведения в движение при 75 % мощности ГД, кВт;  $P_{AEeff}$  – уменьшение мощности вследствие инновационной электрической энергоэффективной технологии при  $P_{ME}$ , кВт;  $P_{AE}$  – требуемая мощность вспомогательных двигателей в ходовом режиме, кВт, для судов с суммарной мощностью ГД менее 10000 кВт

$$P_{AE} = 0,05 \cdot \left( \sum_{i=1}^{n_{ME}} MCR_{MEi} + \frac{\sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTIi}}{0,75} \right);$$

$SFC_{ME}$  – удельный расход топлива ГД при 75 % МДМ (из одобренного Технического файла по  $NO_x$ ), г/(кВт\*ч);  $SFC_{AE}$  – удельный расход топлива ДГ при 50 % МДМ (из одобренного Технического файла по  $NO_x$ ), г/(кВт\*ч);  $f_j$  – поправочный коэффициент, учитывающий конструктивные особенности конкретного судна (для судов ледового класса  $f_{j,min} \leq f_{j0} \leq f_{j,max} = 1$ );  $f_w$  – безразмерный коэффициент, учитывающий уменьшение скорости в обычных погодных условиях (при вычислении Достижимого ККЭЭ  $f_w = 1$ );  $f_{eff}$  – коэффициент готовности инновационной энергоэффективной технологий (для систем утилизации энергии принимается равным 1,0);  $f_i$  – коэффициент грузоемкости, учитывающий необходимость выполнения каких-либо технических или нормативных ограничений грузоемкости судна (принимается равным 1,0, если не доказана необходимость введения иного значения этого коэффициента, для судов ледового класса  $f_{i,min} = 1 \leq f_{i0} \leq f_{i,max}$ );  $f_c$  – поправочный коэффициент на кубическую вместимость, принимается равным 1,0, если не доказана необходимость введения этого коэффициента.

Значения  $f_{j,\min}$  и  $f_{j0}$  вычисляются в соответствии с табл. 1 п. 2.5.8 МЕРС.212(63) в зависимости от типа судна и ледового класса. Для судов ледового класса

$$f_{j0} = \frac{k_1 L_{PP}^{k_2}}{\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)}}, \quad f_{j,\min} = k_3 L_{PP}^{k_4},$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – коэффициенты, приведённые в табл. 2.

Таблица 2

Поправочные коэффициенты

Тип судна	$k_1$	$k_2$	Ледовый класс					
			Arc4		Ice3		Ice2, Ice1	
			$k_3$	$k_4$	$k_3$	$k_4$	$k_3$	$k_4$
Танкер	0,308	1,920	0,27	0,21	0,45	0,13	0,70	0,06
Судно для перевозки генеральных грузов	0,0227	2,483	0,43	0,12	0,56	0,09	0,67	0,07

Значения  $f_{i0}$  и  $f_{i,\max}$  вычисляются в соответствии с табл. 2 п. 2.5.11 МЕРС.212(63) в зависимости от типа судна и ледового класса. Для судов ледового класса

$$f_{i0} = \frac{k_5 L_{PP}^{k_6}}{dwt}, \quad f_{i,\max} = k_7 L_{PP}^{k_8},$$

где  $k_5, k_6, k_7, k_8$  – коэффициенты, приведённые в табл. 3.

Для химовозов

$$f_c = \begin{cases} R^{-0,7} - 0,014, & R < 0,98; \\ 1, & R \geq 0,98, \end{cases}$$

где  $R$  – отношение дедвейта судна, т, к общей объёмной вместимости грузовых танков, м<sup>3</sup>;  $L_{PP}$  – длина между перпендикулярами.

Результаты расчёта для танкеров приведены в табл. 4, а для судов для перевозки генеральных грузов – в табл. 5. Требуемый ККЭЭ определяется как для судов строящихся в 2015 – 2019 годы.

Таблица 3

## Определение поправочного коэффициента

Тип судна	$k_5$	$k_6$	Ледовый класс					
			Arc4		Ice3		Ice2, Ice1	
			$k_7$	$k_8$	$k_7$	$k_8$	$k_7$	$k_8$
Танкер	0,00138	3,331	1,71	-0,08	1,74	-0,06	1,27	-0,04
Судно для перевозки генеральных грузов	0,0377	2,625	1,77	-0,08	1,51	-0,06	1,28	-0,04
Контейнеровоз*	0,1033	2,329	1,71	-0,08	1,47	-0,06	1,27	-0,04
Газовоз	0,0474	2,590	2,10	-0,12	1,60	-0,08	1,25	-0,04

Для проектов танкеров смешанного река-море плавания значения коэффициента преобразования между расходом топлива и выбросом  $\text{CO}_2$  ГД,  $T_{\text{CO}_2} / T_{\text{топлива}} C_{FME} = 3,114$ , коэффициента преобразования между расходом топлива и выбросом  $\text{CO}_2$  ДГ,  $T_{\text{CO}_2} / T_{\text{топлива}} C_{FAE} = 3,206$ , поправочный коэффициент, учитывающий конструктивные особенности судна ледового класса  $f_j = 1,00$ , коэффициент, учитывающий уменьшение скорости в обычных погодных условиях  $f_W = 1,00$ , коэффициент готовности инновационной энергоэффективной технологий  $f_{eff} = 1,00$ , редуцированные коэффициенты  $a = 1218,80$  и  $c = 0,488$ . На всех проектах танкеров смешанного река-море плавания количество ГД  $n_{ME} = 2$  и отсутствуют валогенераторы. Достижимый ККЭЭ для типовых проектов танкеров смешанного река-море плавания  $\leq$  Требуемого ККЭЭ.

Для проектов сухогрузных судов смешанного плавания коэффициент преобразования между расходом топлива и выбросом  $\text{CO}_2$  ГД,  $T_{\text{CO}_2} / T_{\text{топлива}} C_{FME} = 3,114$ , коэффициент преобразования между расходом топлива и выбросом  $\text{CO}_2$  ДГ,  $T_{\text{CO}_2} / T_{\text{топлива}} C_{FAE} = 3,206$ , коэффициент, учитывающий уменьшение скорости в обычных погодных условиях  $f_W = 1,0$ , коэффициент готовности инновационной энергоэффективной технологий  $f_{eff} = 1,0$ , поправочный коэффициент на кубическую вместимость  $f_c = 1,0$ , редуцированные коэффициенты  $a = 107,48$  и  $c = 0,216$ .

\* При вычислении  $f_{i0}$  для контейнеровозов dwt необходимо умножить на 0,7.

Расчёт ККЭЭ для типовых проектов танкеров

Наименование параметра	Обозначение	005RST01	RST22M	RST22M (химвоз)	RST27	RST27 (химвоз)	RST25	1577
Скорость судна, узлы	$V_{ud}$	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	8,8
Действ. д	$d_{\text{дв}}/t$	6457	7050	7050	7022	7022	6710	4875
Мощность ГД, кВт	$P_{ME}$	862,5	900	900	900	900	900	552
МДМ ГД, кВт	$MCR_{ME}$	1150	1200	1200	1200	1200	1200	736
Требуемая мощность ДГ в ходоном режиме, кВт	$P_{DE}$	115	120	120	120	120	120	73,6
Удельный расход топлива ГД, г/(кВт*ч)	$SFC_{ME}$	189	189	189	189	189	189	223
Удельный расход топлива ДГ, г/(кВт*ч)	$SFC_{DE}$	208	208	208	208	208	222	230
Ледовый класс	-	-	-	Ice1(-IC)	Ice1(-IC)	Ice1(-IC)	Ice1(-IC)	Ice1(-IC)
Коэффициент вместимости судна	$f_i$	1,044	1,044	1,044	1,043	1,043	1,043	1,046
Поправочный коэффициент на кубическую вместимость	$f_c$	1	1	1,062	1	1,080	1	1
Объём грузовых танков, м <sup>3</sup>	-	-	-	7832,81	-	7988,07	-	-
Отношение дедвейта, т, к объёму грузовых танков, м <sup>3</sup>	$R$	-	-	0,900	-	0,879	-	-
Длина между перпендикулярами	$L_{pp}$	132,8	134,5	134,5	137,1	137,1	138,24	128,6
Достижимый ККЭЭ	-	15,42	14,74	13,88	14,82	13,71	15,58	18,30
Требуемый ККЭЭ	-	16,59	15,84	15,84	15,87	15,87	16,26	19,22
Редукционный коэффициент	$X$	1,54	1,91	1,91	1,89	1,89	1,69	0,55
	$b$	6457	7050	7050	7022	7022	6710	4875
Достижимый ККЭЭ – Требуемый ККЭЭ	-	1,17	1,09	1,96	1,05	2,16	0,68	0,92



Таблица 5

Расчет ККЭЭ для типовых проектов сухогрузных судов

Наименование параметра	Обозначение	RSD17	DCV36	005RSD06	RSD19	RSD49	00101	19610
Скорость судна, узлы	$V_{суд}$	10,8	11,4	10	10,5	10,5	10,5	10,0
Ледвейт, д	$\Delta_{лв}$	6354	5026	6320	7004	7154	5190	6277
Мощность ГД, кВт	$P_{ME}$	1746	1881	639	900	900	855	728
Количество ГД	$n_{ME}$	1	1	2	2	2	2	2
МДМ ГД, кВт	$MCR_{ME}$	2450	2640	852	1200	1200	1140	970
Мощность вагенератора, кВт	$P_{PTO}$	375	219	0	0	0	0	0
Номинальная мощность вагенератора, кВт	$P_{PTOном}$	500	292	0	0	0	0	0
Максимально допустимое вычитание мощности ГД	$P_{PTOmax}$	122,5	132	0	0	0	0	0
Требуемая мощность ДГ в ходовом режиме, кВт	$P_{ME}$	122,5	132	85,2	120	120	114	97
Удельный расход топлива ГД, г/(кВт*ч)	$SFC_{ME}$	190	189,5	220	190	190	193	220
Удельный расход топлива ДГ, г/(кВт*ч)	$SFC_{DE}$	208	208	230	208	208	208	220
Коэффициент, учитывающий конструктивные особенности судна ледового класса	$f_i$	1,00	0,84	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Ледовый класс	-	ЛУ2 (IC)	Ice3 (IB)	Ice1 (-IC)	ЛУ2 (IC)	Ice2 (IC)	ЛУ2 (IC)	Л3 (IB)
Коэффициент вместимости судна	$f_i$	1,058	1,000	1,053	1,052	1,052	1,056	1,126
Длина между перпендикулярами	$L_{BP}$	116,94	84,94	131,85	135,69	135,74	122,8	134
Достижимый ККЭЭ	-	<b>15,35</b>	<b>17,72</b>	<b>14,10</b>	<b>14,80</b>	<b>14,49</b>	<b>19,18</b>	<b>15,08</b>
Требуемый ККЭЭ	-	<b>15,76</b>	<b>16,77</b>	<b>15,35</b>	<b>15,26</b>	<b>15,26</b>	<b>16,63</b>	<b>15,81</b>
Редукционный коэффициент	$X$	2,80	1,69	2,77	3,34	3,46	1,83	2,73
Достижимый ККЭЭ ≤ Требуемого ККЭЭ	$b$	6354	5026	6320	7004	7154	5190	6277
Достижимый ККЭЭ - Требуемый ККЭЭ	-	Да	Нет	Да	Да	Да	Нет	Да
	-	0,41	-0,95	1,68	0,54	0,76	-2,55	0,73

Как видно из результатов расчёта, большая часть рассмотренных современных проектов удовлетворяют требованиям по ККЭЭ в существующем виде. Среди них все новые нефтеналивные суда проектов 005RST01, RST22M, RST25, RST27 и сухогрузные суда RSD17, RSD19, RSD49, 005RSD06. Исключение составляют сухогрузные суда проектов DCV36 и 00101.

Основными путями повышения ККЭЭ являются следующие.

1. Увеличение дедвейта судна. Хотя увеличение дедвейта требует увеличение мощности ГД, но последняя увеличивается приблизительно пропорционально дедвейту в степени  $2/3$ , что приводит к уменьшению ККЭЭ. При этом следует учитывать, что для судов с большим дедвейтом применяются более строгие требования в отношении ККЭЭ. Для ССП наиболее эффективным путем увеличения дедвейта является рост коэффициента общей полноты и (или) снижения массы судна порожнем [2, 3, 4, 5].

2. Снижение скорости. Это значительно снижает потребную мощность ГД, т. к. последняя находится в кубической зависимости от скорости. Для ССП скорость ограничена условиями внутренних водных путей, поэтому её реальный диапазон находится в пределах 10,0 – 12,0 узлов (обычно 10,5 узлов).

3. Применение новых технологий без изменения дедвейта и скорости судна. Пример такого решения для ССП – разработка обводов танкера проекта RST27 с предельно высоким коэффициентом общей полноты [2, 3]. В ходе таких исследований был специально разработан теоретический корпус судна с коэффициентом общей полноты 0,93. Применена бульбообразная форма носовой оконечности, кормовая оконечность – транцевая, с полутоннелями и скегом. Геометрические характеристики теоретического корпуса: длина по ватерлинии  $L_{WL} = 140,66$  м; ширина  $B = 16,60$  м; осадка расчетная  $T_F = 3,60$  м; коэффициент общей полноты  $C_B = 0,93$ ; коэффициент полноты площади ватерлинии  $C_{WP} = 0,97$ ; коэффициент полноты площади мидель-шпангоута  $C_M = 0,99$ ; коэффициент продольной полноты  $C_P = 0,93$ ; абсцисса центра величины относительная  $\ell_{CB} = 1,01\%$ ; площадь поперечного сечения бульба на НП  $A_{BT} = 4,83$  м<sup>2</sup>; возвышение центра тяжести площади бульба над ОП  $h_B = 2,19$  м; погружённая площадь транца  $A_{TR} = 5,40$  м<sup>2</sup>; абсцисса центра цилиндрической вставки (от середины  $L_{WL}$ )  $x_{PMB} = 2,67$  м; длина цилиндрической вставки  $L_{PMB} = 96,00$  м; длина цилиндрической вставки относительная  $(L_{PMB}/L_{OA}) \ell_{PMB} = 68,1\%$ .

Для численного исследования буксировочных характеристик судна была подготовлена 3D модель корпуса судна с выступающими частями и выполнены расчёты методами вычислительной гидромеханики [3]. Моделирование буксировочных испытаний выполнялось путем решения уравнений Рейнольдса конечно-объёмным методом в расчётной области, внутрь которой помещена 3D модель корпуса судна. Уравнения движения жидкости замкнуты при помощи статистической к-ε модели турбулентности для случая несжимаемой жидкости. Расчёты выполнялись в масштабе природы с намерением избежать влияния масштабных эффектов и процедур пересчёта с модели на натуру [2, 3].

Для прогнозирования результатов ходовых испытаний и ходовых качеств судна в эксплуатации учитывались различия в состоянии поверхности 3D моделей (технически гладкая поверхность) и обшивки корпуса судна после постройки. Полное буксировочное сопротивление включало также воздушное сопротивление в условиях полного штиля  $C_{Air} = 0,100 \cdot 10^{-3}$ .

Буксировочное сопротивление и мощность судна, определенные с помощью методов вычислительной гидродинамики, приведены в табл. 6.

Таблица 6  
Буксировочное сопротивление и мощность судна

$V_s$ , уз	$F_n$	$Rn \cdot 10^8$	$C_R \cdot 10^3$	$C_{FD} \cdot 10^3$	$C_A \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	$R_T$ , кН	$P_E$ , кВт
8,0	0,111	5,085	0,712	1,711	0,038	2,560	70,45	290,1
8,5	0,118	5,403	0,745	1,698	0,040	2,583	80,23	351,0
9,0	0,125	5,721	0,794	1,685	0,041	2,621	91,26	422,7
9,5	0,132	6,039	0,869	1,674	0,042	2,685	104,18	509,4
10,0	0,139	6,357	0,987	1,663	0,043	2,793	120,05	617,9
10,5	0,145	6,674	1,179	1,653	0,044	2,976	141,04	762,3
11,0	0,152	6,992	1,474	1,643	0,045	3,262	169,69	960,8
11,5	0,159	7,310	1,852	1,634	0,046	3,632	206,49	1222,3
12,0	0,166	7,628	2,306	1,625	0,047	4,078	252,46	1559,4
12,5	0,173	7,946	2,890	1,616	0,048	4,655	312,67	2011,7
13,0	0,180	8,263	3,557	1,609	0,049	5,315	386,14	2583,8

Следует обратить внимание, что на скоростях около 10 узлов, основную роль играет трение и сопротивление формы. Волновое сопротивление при этом незначительно, но уже после 10 узлов роль этой составляющей резко возрастает.

С целью проверки результатов этих расчётов, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова провёл в опытовом бассейне буксировочные испытания

модели этого же судна в масштабе 1:16. Они показали, что величины коэффициента остаточного сопротивления при осадке судна в грузу и в балласте практически совпадают до значения числа Фруда  $\sim 0,13$ .

При числе Фруда  $Fn = 0,145$ , соответствующем проектной скорости судна  $V_s = 10,5$  узлов, величина просадки судна составила  $\Delta T/T_F \approx -0,03$  в грузу и в балласте, а возникающий при движении ходовой дифферент судна в грузу  $\psi \approx -0,055^\circ$  и  $\psi \approx 0,065^\circ$  в балласте.

Для анализа условий работы движителей за корпусом судна рассчитаны поля скоростей номинального попутного потока в дисках гребных винтов ВРК.

Номинальный попутный поток может быть определен относительно ВРК в целом и относительно изолированного комплекса "винт-насадка". В первом случае попутный поток обусловлен только влиянием корпуса и ВЧ, во втором – также влиянием обтекателей ВРК. Выбор подхода зависит от того, какие исходные данные о гидродинамических характеристиках движителей в свободной воде используются в расчётах ходкости.

Расчёты ходкости выполнены с использованием гидродинамических характеристик серийных винтов Ка4-70 в направляющих насадках 19А. Поэтому используется номинальный попутный поток, измеренный относительно комплекса "винт-насадка", с учётом обтекателей ВРК как выступающих частей.

Среднее по площади диска значение коэффициента номинального попутного потока с учётом обтекателей ВРК, который действует на комплекс "винт-насадка", составляет  $\psi = 0,168$ .

Взаимодействие между корпусом судна и движителем характеризуют коэффициент эффективного попутного потока  $W_T$ , коэффициент влияния неравномерности попутного потока на пропульсивный КПД  $i$  и коэффициент засасывания  $t_p$ .

Коэффициент эффективного попутного потока приближённо определен на основе измерений номинального поля скоростей попутного потока в диске движителя  $W_T \approx \psi = 0,168$ . Величина коэффициента влияния неравномерности попутного потока принята равной  $i = 1,000$ .

Наиболее сложно прогнозировать величину коэффициента засасывания  $t_p$ , поскольку она в общем случае может быть определена лишь из модельного или численного эксперимента, в котором непосредственно моделируется работа движителей за корпусом судна. Для от-

дельных типов судов с учётом особенностей их пропульсивного комплекса построены эмпирические зависимости между основными геометрическими параметрами корпуса и коэффициентами эффективного взаимодействия, а также между коэффициентом попутного потока и засасывания. Однако для судов с ВРК и в целом с азимутальными движителями подобные зависимости, широко апробированные в проектной практике, пока не известны.

В этих условиях величина коэффициента засасывания  $t_p$  оценена следующим образом. Эмпирическая взаимосвязь между коэффициентами попутного потока и засасывания представлена Альте и Бауром [3] в виде  $(1-t_p) = (1-W_T)^n$ . Показатель степени  $n$  может варьироваться в зависимости от типа судна и пропульсивного комплекса, авторами этой формулы для судов традиционного типа предложены пределы  $n = 0,4 \div 0,8$ .

В анализируемом случае величина  $n$  определена с учётом оценки ходкости, выполненной компанией Schottel для судна близкого типа с ВРК – танкера проекта 005RST01. Согласно этим данным  $W_T = 0,20$ ,  $t_p = 0,25$ . Отсюда  $n = 1,289$ .

Коэффициент засасывания определяется как  $t_p = 1 - (1 - W_T)^n = 1 - (1 - 0,168)^{1,289} = 0,211$ .

Результаты расчёта оптимальных характеристик винта в насадке и ходовых качеств судна с использованием данных систематических модельных испытаний серии Ка4-70 в насадке №19А представлены в табл. 7 ( $J$  – относительная поступь гребного винта). В ней для каждого приведенного значения скорости хода дано шаговое отношение гребных винтов  $P/D_p$ , число их оборотов  $n$  и потребная мощность в расчёте на один главный двигатель  $N_E$ , которые обеспечивают достижение этой скорости в условиях тихой и глубокой воды при 15 %-ном морском запасе. В расчёте приняты следующие значения коэффициентов  $W_T = 0,168$ ,  $t_p = 0,211$ ,  $i = 1,00$ ,  $\eta_S = 0,95$ .

Для оценки полученных результатов полезно сопоставить удельную буксировочную мощность (на  $1 \text{ м}^3$  объёмного водоизмещения) и удельную эффективную мощность с данными прототипов с примерно такими же соотношениями главных размерений и типом ВРК.

На рис. сравнены зависимости удельной эффективной мощности  $N_V$  от скорости для судна, рассмотренного в статье ( $L/B = 8,47$ ,  $B/T = 4,61$  и  $C_B = 0,93$ ) и судна-прототипа ( $L/B = 8,38$ ,  $B/T = 4,61$  и  $C_B = 0,90$ ). При скоростях выше 10,5 узлов наблюдается значитель-

ное влияние коэффициента общей полноты обводов на интенсивность увеличения волнового сопротивления.

Таблица 7

Расчёт оптимального винта и ходовых качеств

$V_s$ , уз.	$R_T$ , кН	$T_p$ , кН	$K_{DT}$	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$P/D_p$	$J$	$K_T$	$10 \cdot K_Q$	$\eta_0$	$\eta_P$	$N_E$ , кВт
8,0	70,4	44,6	0,974	187,2	1,2167	0,5780	0,3520	0,5578	0,5806	0,5231	326,2
8,5	80,2	50,8	0,970	199,6	1,2159	0,5760	0,3527	0,5577	0,5798	0,5224	395,3
9,0	91,3	57,8	0,963	212,5	1,2145	0,5728	0,3538	0,5575	0,5785	0,5212	477,1
9,5	104,2	66,0	0,951	226,5	1,2122	0,5673	0,3556	0,5572	0,5763	0,5192	577,2
10,0	120,0	76,1	0,933	242,1	1,2085	0,5586	0,3585	0,5567	0,5725	0,5158	704,7
10,5	141,0	89,4	0,904	260,8	1,2027	0,5445	0,3631	0,5557	0,5663	0,5102	878,9
11,0	169,7	107,5	0,863	283,5	1,1944	0,5247	0,3695	0,5541	0,5569	0,5017	1126,5
11,5	206,5	130,9	0,818	309,8	1,1850	0,5020	0,3767	0,5520	0,5453	0,4912	1463,7
12,0	252,5	160,0	0,772	339,2	1,1753	0,4784	0,3840	0,5494	0,5321	0,4794	1913,4
12,5	312,7	198,1	0,723	373,7	1,1647	0,4524	0,3920	0,5464	0,5165	0,4654	2542,9
13,0	386,1	244,7	0,676	411,3	1,1548	0,4274	0,3995	0,5431	0,5004	0,4508	3371,2

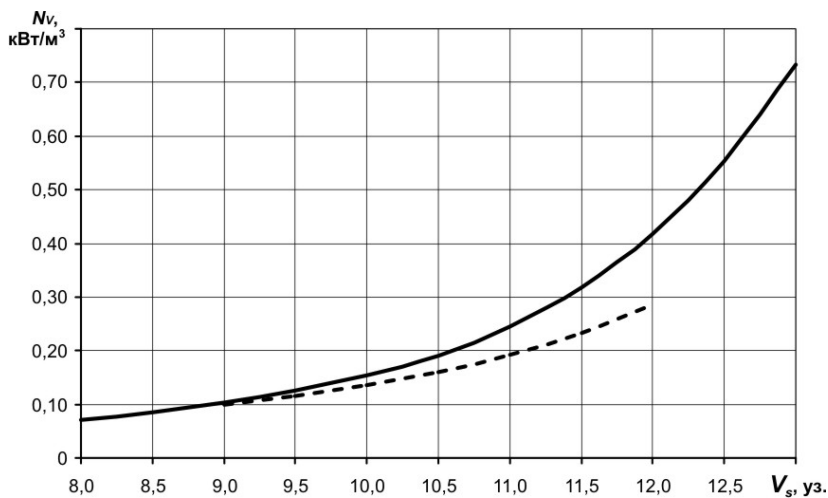


Рис. Зависимость удельной эффективной мощности от скорости для судов с различной полнотой обводов: - -  $L/B = 8,38$ ,  $B/T = 4,61$  и  $C_b = 0,88$ ; —  $L/B = 8,47$ ,  $B/T = 4,61$  и  $C_b = 0,93$

Полученные в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова по результатам буксировочных испытаний величины буксировочной мощности танкера смешанного река-море плавания с большой полнотой весьма удовле-

творительно согласуются с прогнозом по CFD методу и свидетельствуют об отсутствии на корпусе судна значительных отрывных явлений.

Сравнение экспериментальных зависимостей коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда моделей с нормальной (0,90) и большой полнотой (0,93) обводов также показало, что при посадке в грузу величины  $C_R$  для обоих судов достаточно близки.

По данным бассейновых испытаний, в грузу величина буксировочной мощности "полного" судна отличается на ~4 % от судна с коэффициентом полноты около 0,90. В балласте буксировочная мощность  $P_E$  танкера с большой полнотой обводов выше, чем у танкера с нормальной полнотой и при проектной скорости  $V_S = 10,5$  узлов разница составляет ~80 кВт (около 13 %).

**На типичных для судна смешанного река-море плавания скоростях 10 узлов влияние коэффициента полноты (для диапазона 0,88 ... 0,93) – незначительно.**

Этот вывод принципиален и означает, что можно увеличивать коэффициент общей полноты для судов смешанного река-море плавания до 0,93.

*Заключение.* Большая часть проектов смешанного плавания нового поколения удовлетворяют требованиям по ККЭЭ в существующем виде, что позволяет продолжать серийное строительство проектов RST22M, RST25, RST27, RSD49 после 1 января 2013 г.

Пока что существует много открытых вопросов в области требований к энергоэффективности судов. Например, повышение ККЭЭ путём снижения мощности ГД может отразиться на безопасности мореплавания при неблагоприятных погодных условиях. Для предотвращения такой ситуации ИМО планирует разработать специальное руководство по определению минимальной мощности судовой энергетической установки (п. 21.5 [7]).

Опытные бассейны оспаривают предлагаемое ИМО жёсткое нормирование коэффициентов, используемых при пересчёте результатов модельных испытаний на натуру, на основании статистических данных натурных испытаний. Сегодня для этих целей используются последние достижения в области вычислительной гидродинамики [6].

В настоящий момент правилами не предусматривается возможность определения пропульсивных характеристик судна путём компьютерного моделирования с использованием методов вычислительной гидродинамики, хотя этот подход получает всё большее распространение в последние годы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришкин В.В. О деятельности в области сокращения выбросов парниковых газов с судов // Науч.- техн. сб. Российского морского Регистра судоходства. – 2011. – Вып. 34. – С. 153 – 166.

2. Егоров Г.В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска. – СПб.: Судостроение, 2007. – 384 с.

3. Егоров Г.В., Каневский Г.И., Станков Б.Н. Исследование ходовых качеств судна смешанного плавания большой полноты с винторулевыми колонками // Морская Биржа. – 2011. – №4 (38). – С. 16 – 20.

4. Егоров Г.В., Ильницкий И.А., Станков Б.Н., Печенюк А.А. Проработка вариантов пропульсивного комплекса судна смешанного плавания класса "Волго-Дон макс" // Морской вестник. – 2011. – №2 (38). – С. 101 – 106.

5. Егоров Г.В., Тонюк В.И., Станков Б.Н., Печенюк А.В. Оптимизация обводов судна смешанного плавания класса "Волго-Дон макс" // Морской вестник. – 2012. – №1 (41). – С. 71 – 77.

6. Пустошный А.В. Energy efficiency design index - новая реальность от ИМО // Судостроение. – 2012. – №1. – С. 11 – 17.

7. Резолюция МЕРС.203(62). Поправки к приложению к протоколу 1997 года об изменении международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, изменённой протоколом 1978 года к ней (Включение правил энергоэффективности для судов в Приложение VI к Конвенции МАРПОЛ).

8. Cerup-Simonsen B., de Kat J. O., Jakobsen O.G., Pederson L.R., Peterson J.B., Posborg T. An Integrated Approach towards Cost-Effective Operation of Ships with Reduced CNG Emissions // Trans. SNAME. – Vol. 118. – 2010. – SNAME, New Jersey: Published 2012. – P. 381 – 396.

9. Gratsos G.A., Psaraftis H.N., Zachariadis P. Life-cycle CO2 emissions of bulk carriers // Trans. RINA. – Vol. 152, Part A3. – International Journal of Marine Engineering. – Jul-Sep 2010. – P. A-119 – A-134.

10. Implementing the Energy Efficiency Design Index (EEDI). Guidance for owners, operators and shipyards. – Lloyd's Register, 2012.

11. Kopke Martin, Sames C. Pierre. Outlook CO2 Emissions of the Worldwide Container ship fleet and Possible Reduction Targets // Germanischer Lloyd nonstop. – 2011. – Issue 2. – P. 63 – 71.

12. МЕРС 60/4/35. Prevention of Air Pollution from Ships, Mandatory EEDI requirements. - Draft text for adding a new part to MARPOL Annex VI for regulation of the energy efficiency of ships.

13. Murphy A.J., Weston S.J. Reducing fuel usage and CO2 emissions from tug boat fleets: sea trials and theoretical modeling // Trans. RINA. – Vol. 154, Part A1. – International Journal of Marine Engineering. – Jan-



Mar 2012. – P. A-31 – A-41.

14. Ozaki Y., Larkin J., Baker C., Tikka K., Michel K. An Evaluation of the Energy Efficiency Design Index (EEDI) Baseline for Tankers, Containerships and LNG Carriers // Trans. SNAME. – Vol. 118. – 2010. – SNAME, New Jersey: Published 2012. – P. 162 – 179.

15. Resolution MEPC.213(63). 2012 guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP).

16. Resolution MEPC.214(63). 2012 guidelines on survey and certification of the energy efficiency design index (EEDI).

17. Resolution MEPC.212(63). 2012 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships.

18. Rules for Classification and Construction. VI Additional Rules and Guidelines. 13 Energy Efficiency. 1 Guidelines for Determination of the Energy Efficiency Design Index. – Germanischer Lloyd, 2012.

19. Stott P.W., Wriqth P.N.H. Opportunities For Improved Efficiency and Reduced CO2 emissions in dry bulk shipping stemming from the relaxation of the Panamax beam construction // Trans. RINA. – Vol. 153, Part A 4. – International Journal of Marine Engineering. – Oct-Dec 2011. – P. A-215 – A-229.