

## О ВАЛЬНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК СУДОВ

Наиболее сложный и функционально значимый комплекс судов – это их энергетические установки. С ростом грузоподъемности и скорости судов повышается мощность судовых энергетических установок (СЭУ), насыщенность их различного рода механизмами, средствами механизации и автоматизации. Капитальные затраты на СЭУ достигают 40% стоимости судов, а эксплуатационные – 60% судовых расходов. В связи с этим технико-эксплуатационные показатели судов в значительной степени зависят от обоснованности принимаемых при проектировании СЭУ решений.

В настоящее время и на ближайшую перспективу доминирующим типом СЭУ остается дизельная энергетическая установка (ДЭУ). При этом традиционно считается, что для морских транспортных судов оптимальной является одновальная установка с винтом фиксированного шага (ВФШ), а для судов река-море плавания – двухвальная [1,2].

Разработанная методика позволяет оценить влияние на эффективность главного энергетического комплекса (ГЭК) СЭУ различных факторов, в том числе и вальности (числа гребных валов или что одно и то же движителей) судна.

Ключевым моментом этой методики является аддитивная функция «полином», которая представляет собой "свёртку" 7 параметров составляющих элементов комплекса и СЭУ в целом [3]:

$$K_k = (a_1 p/p_{\max}) + (a_2 r/r_{\max}) + (a_3 m_{\min}/m) + (a_4 b_{\min}/b_n) + \\ + (a_5 b_{\min}/b) + (a_6 \eta_{\text{пр}}/\eta_{\text{прmax}}) + (a_7 c_{\min}/c),$$

где  $K_k$  – комплексный показатель (коэффициент конкурентоспособности) альтернативного состава ГЭК (с показателями  $p$ ,  $r$ ,  $m$ ,  $b_n$ ,  $b$ ,  $\eta_{\text{пр}}$  и  $c$ );

$p = P_{\text{ГЭК}}/(d \cdot \text{ш} \cdot \text{в})$ , (где  $P_{\text{ГЭК}}$  – мощность ГЭК, кВт;  $d$ ,  $\text{ш}$  и  $\text{в}$  – габариты (длина, ширина и высота) ГЭК, м) – удельная мощность ГЭК, кВт/м<sup>3</sup>;

$r$  – ресурс до капитального ремонта главного двигателя, часов;

$m = M_{\text{ГЭК}}/P_{\text{ГЭК}}$ , (где  $M_{\text{ГЭК}} = x(M + M_{\text{п}} + M_{\text{в}} + M_{\text{г}})$  – масса ГЭК;  $M$ ,  $M_{\text{п}}$ ,  $M_{\text{в}}$  и  $M_{\text{г}}$  – масса главного двигателя, главной передачи, валопровода и гребного винта) – удельная масса ГЭК, кг/кВт;

$b_n$  – удельный расход топлива главного двигателя, кг/кВт\*ч;

$b$  – удельный расход масла главного двигателя, кг/кВт\*ч;

$\eta_{\text{пр}}$  – пропульсивный коэффициент гребного винта;

$c = x k_{\text{тэ}} [1 + (M_{\text{п}} + M_{\text{в}} + M_{\text{г}})/M] x \Pi / (r P_{\text{ГЭК}})$  – удельная стоимость энергии, вырабатываемой ГЭК при эксплуатации, у.е./кВт\*ч (где  $x$  – количество главных двигателей;  $r$  – ресурс главного двигателя в часах;  $k_{\text{тэ}}$  – коэффициент, учитывающий степень использования мощности главных двигателей и затраты на эксплуатацию СЭУ (на эксплуатационные материалы, техническое обслуживание, ремонт и т.д.);  $\Pi$  – стоимость главного двигателя, у.е.);

$p_{\max}$  – максимальное значение удельной мощности среди альтернативных составов ГЭК, кВт/м<sup>3</sup>;

$r_{\max}$  – максимальное значение ресурса среди альтернативных главных двигателей, тыс. ч;

$m_{\min}$  – минимальное значение удельной массы среди альтернативных составов ГЭК, кг/кВт;

$b_{\min}$  – минимальное значение удельного расхода топлива среди альтернативных главных двигателей, кг/кВт\*ч;

$b_{\min}$  – минимальное значение удельного расхода масла среди альтернативных главных двигателей, кг/кВт\*ч;

$\eta_{\text{прmax}}$  – максимальное значение пропульсивного коэффициента гребного винта среди альтернативных составов ГЭК;

$c_{\min}$  – минимальное значение удельной стоимости энергии, вырабатываемой при эксплуатации, среди альтернативных составов ГЭК, у.е./кВт\*ч.

$a_i$ , (где  $i = 1-m$ ;  $m = 7$ ) – коэффициенты весомости указанных частных показателей, определяемые на основе попарного ранжирования их по значимости с последующим двукратным нормированием, а именно:  $\sum a_i = 1$  и значение коэффициентов весомости ограничивается числом  $2/m$ .

Использование аддитивной функции позволяет все обоснования представить в цифровой форме и, разработав компьютерную интеллектуальную технологию, оценить влияние различных факторов на эффективность комплекса. Ниже приведены данные альтернативных составов ГЭК применительно к грузовому судну смешанного плавания водоизмещением 7000 тонн, осадкой в полном грузу 3,5 м: первый вариант – одновальный проектный; второй – двухвальный проектный; третий – двухвальный реально существующий (таблица 1).

Таблица 1

Сопоставление эффективности вариантов главного энергетического комплекса судна

ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР СОСТАВА ГЛАВНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА				
Мощность главных двигателей проекта, кВт	1352	1352	1352	=((E23/E27)^(2/3))*((E24/E29)
Количество главных двигателей	1	2	2	=E32
Трубуемая мощность главного двигателя, кВт	1352	676	676	=E63/E64
<b>ПАРАМЕТРЫ</b>				
<b>размерность</b>				
	6ЧН25/30	Марка дизеля 4ЧН20/28	6ЧРН36/45	=ИНДЕКС(Дизели)\$B\$1:\$P\$
<b>ГЛАВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ</b>				
Число цилиндров	6	4	6	=ИНДЕКС(Дизели)\$B\$1:\$P\$
Номинальная эффеkтивная мощность, кВт	1323	720	660	
Номинальная частота к/вала, об/мин	900	1000	375	
Реверсивность (да-1; нет-0)	0	0	1	
Удельный расход топлива, кг/кВт*ч	0,196	0,193	0,226	0,193 →МИН (C76:E
Удельный расход масла, кг/кВт*ч	0,001	0,001	0,0016	0,001 →МИН (C76:E
Род топлива (ДТ-41800; Л-42700)	42700	42700	41800	
Габаритные размеры, м:				
длина	3,82	2,51	5,6	
ширина	1,4	1,5	1,78	
высота	2,46	2,525	3,7	
Масса, кг	12000	7200	32165	
Ресурс до капитального ремонта, тыс. ч	50	50	40	50 →МАКС (C83:I
Эффективный КПД	0,43	0,44	0,38	
Стоимость, у.е.	606263	337661	194259	
Статистический эксплуатационный коэффициент	3	3	2,5	
<b>ГЛАВНАЯ ПЕРЕДАЧА</b>				
Скорость проектируемого судна		19,9	20,4	19,8
КПД передачи		0,97	0,97	1,00
Коэффициент засасывания		0,21	0,18	0,18
Возможный максимальный диаметр ВФШ, м		2,54	2,19	2,19
Оптимальная частота гребных винтов, об/мин		261	250	247
Отношение мощности к оборотам, кВт/(об/мин)		1,47	0,72	1,76
Требуемое передаточное число		3,45	3,99	1,52
Марка механической передачи		RR1941	RR840	
Номинальное передаточное число		2,962	3,905	1
Допустимое отношение мощности к оборотам, кВт/(об/мин)		2	1,01	
Габаритные размеры, м:				
длина		1,62	1,18	0
ширина		1,51	1,3	0
высота		1,7	1,505	0
Масса, кг		4500	2200	0
<b>ВАЛОПРОВОД</b>				
КПД		0,98	0,98	0,98
Коэффициент неравномерности вращения		0,46	0,46	0,46
Минимальный диаметр, м		0,185	0,160	0,137
Диаметр промежуточных валов, м		0,19	0,16	0,14
Диаметр гребных валов, м		0,21	0,18	0,16
<b>ГРЕБНЫЕ ВИНТЫ</b>				
Частота вращения, об/мин		304	256	375
Пропульсивный коэффициент		0,50	0,54	0,44
		0,50	0,54	0,44
		1,95	2,83	1,31
Диаметр, м		1,9	2,0	1,3
Масса, кг		609	691	186
<b>ГЛАВНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС</b>				
КПД ГЭК		0,20	0,22	0,17
Номинальная мощность, кВт		1283	1397	1320
Удельная мощность, кВт/м.куб.		68,5	50,0	17,9
Удельная масса, кг/кВт		13,3	14,4	49,0
Удельная стоимость энергии, уе/кВт*ч		0,040	0,081	0,037
				0,037 →МИН (C119:I
<b>Относительные</b>				
Удельная мощность		1,00	0,73	0,26
Удельная масса		1,00	0,92	0,27
Удельный расход топлива		0,98	1,00	0,85
Удельный расход масла		1,00	1,00	0,63
Ресурс до капремонта		1,00	1,00	0,80
Пропульсивный коэффициент		0,92	1,00	0,82
Удельная стоимость энергии		0,92	0,46	1,00
<b>КОМПЛЕКСНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ</b>		<b>0,971</b>	<b>0,927</b>	<b>0,756</b>
				0,971 →МАКС (C128
<b>ВЫБОР СОСТАВА ГЛАВНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА</b>				
<b>ГЛАВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ:</b>				
Марка	6ЧН25/30	=ЕСЛИ(F128=C128;C66;ЕСЛИ(F128=D128;D66;ЕСЛИ(F12		
Количество	1	=C62		
Номинальная мощность, кВт	1323	=ЕСЛИ(\$C\$132=\$C\$66;C70;ЕСЛИ(\$C\$132=\$D\$66;D70;E		
Номинальная частота к/вала, об/мин	900			
Реверсивность (да-1; нет-0)	0			
Удельный эф.расход топлива, кг/кВт*ч	0,196			
Удельный эф.расход масла, кг/кВт*ч	0,001			
Род топлива (ДТ-41800; Л-42700)	42700			
Ресурс до капремонта, тыс. ч	0			
Габаритные размеры, м:				
длина	3,82			
ширина	1,4			
высота	2,46			
Масса, кг	12000			
Масса, кг	50			
<b>ГЛАВНАЯ ПЕРЕДАЧА:</b>				
Марка	RR1941	=ЕСЛИ(\$C\$134=\$C\$68;C95;ЕСЛИ(\$C\$134=\$D\$68;D95;E		
Передаточное число	2,962			
Габаритные размеры, м:				
длина	1,62			
ширина	1,51			
высота	1,7			
Масса, кг	4500			
<b>ВАЛОПРОВОД</b>				
Диаметр промежуточных валов, м	0,19			
Диаметр гребных валов, м	0,21			
<b>ГРЕБНЫЕ ВИНТЫ</b>				
Частота вращения, об/мин	304			
Пропульсивный коэффициент	0,50			
Диаметр, м	1,9			
Масса, кг	609			

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что на эффективность ГЭК заметно влияют показатели всех его составных элементов (главных двигателей, главных передач, валопровода и гребных винтов), а также и вальность установки. Причем, как данные таблицы, так и имеющиеся аналогичные оценки [4] показывают, что, если подходить к обоснованию состава ГЭК из приоритетов надежности и экономичности, то комплексный показатель одновальной установки, как правило, несколько выше по сравнению с двухвальными установками. Причина этого состоит в том, что при практически равных других показателях одновальная установка имеет существенно более высокие массогабаритные показатели (удельную мощность и удельную массу) и меньшие удельные эксплуатационные затраты (расходы на эксплуатацию СЭУ с одним пропульсивным комплексом объективно меньше, чем с двумя).

Между тем, с энергетической точки зрения преимущества одновальной установки не столь очевидны. Действительно, если сравнить альтернативные варианты с близкими показателями энергетической эффективности (варианты 1 и 2), то видно, что пропульсивный коэффициент гребных винтов  $\eta_{пр}$  и КПД ГЭК у двухвальной установки заметно ниже ( $\eta_{пр}$  на 8%, а КПД ГЭК на 10%), чем у двухвальной. Объясняется это тем, что при установке одного винта удельная нагрузка на него резко повышается, вследствие этого его КПД, а соответственно и пропульсивный коэффициент и КПД ГЭК снижаются.

Исходя из данных таблицы 1, для обеспечения энергетической эффективности одновальной установки (первый вариант) как у двухвальной (второй вариант) осадка судна  $T$  должна быть не менее

$$T = \left\{ \frac{525}{\rho_n} \left[ \frac{P_n \eta_n \eta_v \eta_{пр}}{v(1-t)} \right]^{1/2} \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{525}{261} \left[ \frac{1323 \cdot 0,97 \cdot 0,98 \cdot 0,54}{19,9(1-0,21)} \right]^{1/2} \right\}^{1/2} = 3,64 \text{ м,}$$

(где  $P_n$  – номинальная мощность главного двигателя, кВт;  $\eta_n$ ,  $\eta_v$  и  $\eta_{пр}$  – КПД главной передачи, валопровода и пропульсивный коэффициент гребного винта;  $v$  – скорость судна в полном грузу, км/ч;  $t$  – коэффициент засасывания), что превышает фактическую осадку рассматриваемого судна.

Именно в связи с последним для обеспечения возможно более эффективного использования мощности энергетических установок в условиях ограниченного фарватера и удовлетворения повышенных требований к судам смешанного плавания по маневренности и живучести их строят преимущественно двухвальными.

Что касается морских судов, то для них требования в частности по маневренности менее жесткие, а ограничения по осадке практически отсутствуют. В связи с этим у морских судов удастся обеспечить достаточную эффективность одновальных энергетических установок мощностью вплоть до 30 МВт. В таких установках, например, при частоте вращения гребного винта 100 об/мин его пропульсивный коэффициент может достигать 76-77%. Для этого согласно последней зависимости при прямой главной передаче необходимым условием является то, что осадка судна должна быть не менее 13-14 м.

#### Литература

1. Проектирование судов внутреннего плавания/Н.К.Дормидонтов, В.Н.Анфимов, П.А.Малый и др.- Л.: Судостроение, 1974. – 335 с.
2. Ачкинадже, А.Ш. Автоматизированное проектирование пропульсивного комплекса морского транспортного судна: учебное пособие/ А.Ш. Ачкинадже, В.В.Гаврилов, И.Э.Степанов. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2000. – 75 с.
3. Методические указания по курсовому проектированию по дисциплине «Судовые энергетические установки»: специальность 140200/А.С.Баёв - СПб.: ИПЦ СПбГУВК, 1997.
4. Баёв, А.С. Комплексное обоснование состава энергетических установок транспортных судов смешанного плавания/А.С.Баёв//Научный электронный архив РАЕ. 12.03.2018. URL: <http://www.econf.rae.ru/article/11096>.