

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МОРСКИХ СУДОВ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ СКОРОСТИ ХОДА

*А.С. Пунда, к.т.н., профессор, В.И. Дмитренко, аспирант
Государственный университет морского и речного флота
имени адмирала С.О. Макарова*

Рассматривается наиболее эффективный путь снижения выбросов экологически вредных веществ на единицу транспортной работы судна в соответствии с дополнениями к Приложению VI Международной конвенции МАРПОЛ 73/78. Снижение путевого расхода топлива при выборе оптимальной скорости хода обеспечивает уменьшение прямо связанных с ним вредных выбросов в атмосферу энергетической установкой судна.



В развитие экологических требований к морским судам международная морская организация (ИМО) приняла поправки к Приложению VI, согласно которым суда, построенные с 01.01.2013, должны соответствовать требованиям по ограничению выброса углекислого газа (CO₂) [2, 3, 5]. С этой целью при проектировании новых судов определяется конструктивный коэффициент энергоэффективности (EEDI — Energy Efficiency Design Index).

Целью введения EEDI является повышение КПД энергетической установки и снижение тем самым расхода топлива и прямо связанных с ним величин выброса в атмосферу углекислого газа и экологически вредных веществ.

В соответствии с Резолюциями № 62 (июль 2011 г.) и 63 (март 2012 г.) Комитета ИМО по предотвращению загрязнения морской среды (КЗМС) с 01.01.2013 г. для любого судна валовой вместимостью 400 т и более должны быть разработаны журнал и план энергоэффективности (SEEMP — Ship Energy Efficiency Monitoring Plan). Для старых судов рекомендуется также определять эксплуатационный показатель энергоэффективности судна (EEOI — Energy Efficiency Operational Indicator), который определяется как масса углекислого газа, выделяемого энергетической установкой судна, деленная на тонну-милю перевезенного груза. Для новых судов EEDI и SEEMP вводятся как обязательные. Положения этих резолюций включены в Приложение VI к МАРПОЛ 73/78 [2].

На 65-й сессии КЗМС (май 2013 г.) было внесено предложение о разработке стандарта, согласно которому определяется среднее по каждой группе судов значение EEOI с последующим установлением его как обязательного нормативного показателя для всех судов (по аналогии с нормированием EEDI).

Задача ограничения выбросов оксидов азота от судовых двигателей была возложена на двигателестроителей и практически не коснулась эксплуатационников. Ограничение выброса CO₂ будет решаться на стадии проектирования новых судов путем обеспечения требуемого уровня конструктивного коэффициента энергоэффективности.

Введение нормативов по EEOI (предположительно через 4–5 лет) планируется как рыночный механизм по ограничению выброса CO₂ в эксплуатации и, по-видимому, целиком будет сферой ответственности судоходных компаний. Производимые в настоящее время дизели оптимизированы по удельному расходу топлива на диапазон мощностей 75–100 % от номинала. Как будет показано ниже, для обеспечения требований по минимизации EEOI необходимо производство дизелей, обеспечивающих длительную надежную работу в диапазоне мощностей 15–100 %.

В настоящее время в качестве рабочего инструмента повышения энергоэффективности судна в эксплуатации при составлении SEEMP рекомендуется определять эксплуатационный показатель энергоэффективности EEOI, г CO₂/(т-миль) [4]:

$$EEOI = \frac{\sum_i FC_i \cdot C_{Fi}}{\sum_i m_{\text{cargo},i} \cdot D_i}, \quad (1)$$

где FC_i — масса топлива (г), израсходованного энергетической установкой в i -м рейсе; C_{Fi} — коэффициент, определяемый сортом и составом топлива (табл. 1); $m_{\text{cargo},i}$ — масса перевезенного груза (т); D_i — расстояние (миль) в i -м рейсе соответственно.

Формула (1) служит для определения среднего за определенный период эксплуатации значения EEOI. На отдельных этапах эксплуатации судна, когда масса перевозимого груза не изменяется, может быть подсчитан текущий эксплуатационный показатель энергоэффективности:

$$EEOI = \frac{FC \cdot C_F}{m_{\text{cargo}} \cdot D}. \quad (2)$$

Потребление топлива энергетической установкой складывается из масс топлива, израсходованного на главный двигатель FC_{ME} , вспомогательные двигатели FC_{AE} и вспомогательный котел FC_{AB} . В формулах (1) и (2) принято, что все элементы СЭУ работают на одном и том же сорте топлива, поэтому коэффициент C_F (см. табл. 1) не дифференцирован по потребителям топлива. Если в энергетической установке используются различные сорта топлив, в числителе формулы (2) следует записать $FC_{ME} \cdot C_{FME} + FC_{AE} \cdot C_{FAE} + FC_{AB} \cdot C_{FAB}$. Соответствующие коррективы вносятся и в формулу (1). Как видно из табл. 1, для жидких топлив различных сортов значения C_F мало отличаются, поэтому учитывать различия целесообразно только в случае использования газообразного топлива (газовозы с использованием газа/жидкого топлива для главных двигателей).

Таблица 1

Величина выброса CO₂ при сжигании различных топлив

Тип топлива	Ссылка	Содержание углерода	C_F (т CO ₂ /т топлива)
Дизельное топливо/газойль	ИСО 8217 Сорта DMX+DMB	0,8774	3,206
Легкое топливо	ИСО 8217 Сорта DMX+DMB	0,8594	3,151
Тяжелое топливо	ИСО 8217 Сорта RME+RMK	0,8493	3,114
Сжиженный нефтяной газ	Пропан	0,8182	3,000
	Бутан	0,8264	3,030
Сжиженный природный газ		0,7500	2,750

Следует отметить, что хотя EEDI и EEOI имеют сходный физический смысл, они принципиально отличаются тем, что первый определяется с использованием дедвейта судна (DWT) в знаменателе формулы, а второй — с использованием массы перевезенного груза. Поскольку DWT всегда больше m_{cargo} , то $EEDI < EEOI$. Кроме того, конструктивный коэффициент энергоэффективности — величина постоянная, а EEOI от рейса к рейсу меняется, так как зависит от режима работы двигателей, загрузки судна, условий плавания и др.

Вполне очевидно, что при оценке энергоэффективности судна в эксплуатации можно использовать разность $EEOI - EEDI$. Чем меньше эта разность, тем выше энергоэффективность.

Любые мероприятия, направленные на уменьшение эксплуатационного расхода топлива СЭУ, способствуют не только снижению выброса углекислого газа, но и абсолютной массы выбрасываемых в атмосферу оксидов азота и серы. Поскольку основным типом СЭУ транспортных судов являются дизельные энергетические установки, в дальнейшем будем рассматривать только их.

В 1990-х годах широко проводились исследования по организации эксплуатации судов с учетом энерго- и ресурсосберегающей технологии использования энергетических установок. Основные положения ранее выполненных исследований по удельному путевому расходу топлива изложены в работе [1].

При эксплуатации судов бывают периоды длительной работы с пониженной мощностью и скоростью. Такие режимы называются режимами экономичного хода. В отличие от режима полного хода, затраты топлива на единицу транспортной производительности судна на режиме экономичного хода уменьшаются. Снижение расхода топлива от использования режимов экономичного хода объясняется кубической зависимостью буксировочной мощности от скорости, а следовательно, и близким к ней изменением расхода топлива.

Дополнительные технические ограничения на скорость обусловлены необходимостью в условиях длительного режима обеспечить надежную работу системы утилизации и исключить интенсивное нагарообразование в цилиндрах, трактах при мощности ниже 40 % от номинальной.

При оценке энергоиспользования на различных ходах судна определяющее значение будет иметь удельный путевой расход топлива на установку, кг/миля, $g_V = CF/V$ или $g_V = FC/D$, где CF — расход топлива на всю энергетическую установку (главные дизели, вспомогательные дизели и вспомогательные котлы), кг/ч; V — скорость

судна, миль/ч; FC — масса топлива, израсходованная на энергетическую установку, кг; D — расстояние (миль). Используя понятие удельного путевого расхода топлива, запишем формулу (2) для текущего значения эксплуатационного показателя энергоэффективности судна в следующем виде:

$$EEOI = \frac{g_V \cdot C_F}{m_{\text{cargo}}} \left[\frac{\text{г CO}_2}{\text{т} \cdot \text{миля}} \right]. \quad (3)$$

Таким образом, текущее значение $EEOI$ согласно формуле (3) прямо пропорционально величине удельного путевого расхода топлива на установку. Минимизация удельного путевого расхода обеспечивает наименьшее значение эксплуатационного показателя энергоэффективности.

Для выбора эффективного экономичного хода следует определить коэффициент снижения скорости $\bar{V} = V/V_0$ и связанные с ним относительные путевые расходы топлива $\bar{g}_V = g_V/g_{V_0}$ [здесь и далее обозначения с индексом «ноль» относятся к исходному (нормируемому) режиму полного хода].

Основой для вывода расчетных зависимостей \bar{g}_V (\bar{V}) является текущий путевой расход топлива, представленный как сумма расходов на главные дизели и вспомогательное потребление, т. е. $g_V = g_{ME} + g_{AX}$, или в относительных величинах (при делении на $g_{V_0} = CF_0/V_0$) $\bar{g}_V = \bar{g}_{ME} + \bar{g}_{AX}$.

Для водоизмещающих судов с винтами фиксированного шага согласно известным соотношениям эффективной мощности главного двигателя $P_{eME} \sim n^3$ и скорости $V \sim n$ путевой расход топлива на главные дизели будет пропорционален квадрату скорости $g_{ME} = (b_{eME} \cdot P_{eME})/V = b_{eME} V^2$, а его относительное значение $\bar{g}_{ME} = g_{ME} + g_{V_0}$ определится равенством

$$\bar{g}_{ME} = \bar{b}_{eME} \cdot \bar{V}^2 \cdot X_0, \quad (4)$$

где X_0 — относительный расход топлива главными дизелями на исходном режиме полного хода, $X_0 = CF_{ME0}/CF_0$; $\bar{b}_{eME} = b_{eME}/b_{eME0}$ — относительный удельный эффективный расход топлива главным двигателем.

Следовательно, закономерности \bar{g}_V (\bar{V}) для различных постоянных X_0 на режимах винтовой характеристики при $\bar{b}_{eME} = 1$ представляют собой квадратичные параболы. В рассматриваемом диапазоне скоростей ($1 > \bar{V} > 0,7$) эта коррекция незначительна. В точке минимального удельного расхода \bar{b}_{eME} равно 0,985 и уменьшается до 0,955 для дизеля, оптимизированного на режимы работы с пониженной мощностью.

В противоположность \bar{g}_{ME} относительный путевой расход топлива на вспомогательное потребление при постоянном абсолютном расходе

$CF_{AX} = (1 - X_0) CF_0$ выражается гиперболической зависимостью

$$\bar{g}_{AX} = \frac{1 - X_0}{\bar{V}} = \frac{Z_0 + Y_0}{\bar{V}}, \quad (5)$$

где Z_0, Y_0 — относительные расходы топлива на вспомогательные котлы и дизели.

Суммируя (4) и (5), получим выражение относительного путевого расхода топлива на установку

$$\bar{g}_V = \bar{b}_{eME} \cdot \bar{V}^2 \cdot X_0 + \frac{1 - X_0}{\bar{V}}, \quad (6)$$

При $0,68 < X_0 < 1$ функция расхода топлива \bar{g}_V (\bar{V}) имеет минимум (рис. 1), однако для характерных рабочих значений $X_0 = 0,9 - 0,96$ этот минимум лежит в области скоростей малого хода ($\bar{V} = 0,3 - 0,4$). Длительная работа на таких режимах для современных малооборотных дизелей неприемлема вследствие указанных выше технических ограничений.

В качестве оптимальных можно принять значения \bar{V} , для которых имеет место наибольшая разность между кривой \bar{g}_V (\bar{V}) и линией скорости \bar{V} (см. рис. 1)

$$\Delta = (\bar{V} - \bar{g}_V) = \max. \quad (7)$$

Условию (7) отвечает оптимальная скорость $\bar{V}_{\text{опт}}$. Как следует из рис. 1, с уменьшением X_0 (повышенным расходом топлива на вспомогательные нужды) значения режима $\bar{V}_{\text{опт}}$ смещаются в область больших значений \bar{V} и разность между путевым расходом топлива и скоростью сокращается.

Дифференцируя по \bar{V} выражение (7), получим

$$\Delta = \bar{V} - \left(\bar{b}_{eME} \cdot \bar{V}^2 \cdot X_0 + \frac{1 - X_0}{\bar{V}} \right).$$

При $\bar{b}_{eME} = 1$ по правилам нахождения экстремума функции $\Delta(\bar{V})$, получаем

$$\bar{V}_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{1 - X_0}{2 \cdot \bar{V}_{\text{опт}} X_0 - 1}}.$$

Таким образом, если на исходном режиме полного хода известна доля расхода топлива на главные дизели X_0 , то определение скорости экономичного хода $\bar{V}_{\text{опт}}$ не вызывает затруднений. Однако в установках с винтом фиксированного шага (ВФШ) при рабочих значениях $X_0 \geq 0,9$ получаем $\bar{V}_{\text{опт}} < 0,7$ и $P_{eME} < 35\%$. Это значит, что режим экономичного хода выходит за пределы допустимого снижения мощности (35% от номинальной) и не может быть рекомендован для длительных условий работы.

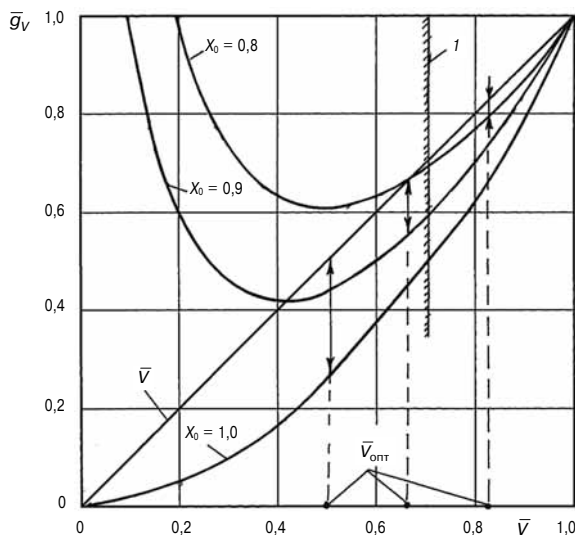


Рис. 1 Зависимость относительного путевого расхода топлива от изменения скорости

Ограничение длительной минимальной мощности главного двигателя на уровне 35 % от ее номинального значения определяет минимальную относительную скорость судна (отмечена линией 1 на рис. 1). При этой скорости судна наибольшее снижение удельного путевого расхода топлива имеет место при $X_0 = 1$ (расход уменьшается на 50 %). Полная утилизация тепла главного двигателя на режимах минимальной мощности проблематична, особенно для установок с главными малооборотными дизелями (низкая температура ОГ, включение электроприводных воздуходувок и др.). Поэтому реально возможное снижение удельного путевого расхода составляет не более 40 %.

Из приведенного анализа также следует, что при указанном выше ограничении минимальной длительной мощности главного двигателя задача точного определения величины $V_{\text{опт}}$ не имеет оптимального решения. Для назначения режима максимально возможного снижения удельного путевого расхода топлива достаточно снизить скорость судна до 0,71 от проектной скорости.

Используя рассмотренные выше закономерности для относительного путевого расхода топлива, определим на конкретном примере потенциал повышения энергоэффективности судна за счет выбора режима работы главного двигателя.

В табл. 2 приведены эксплуатационные данные балкера дедвейтом 30 000 т и скоростью хода $V = 14,0$ узлов (2007 г. постройки). Судно оборудовано одним малооборотным главным двигателем фирмы «МАН Дизель и Турбо» типа 6S42MC (6ДКРН42/178), $P_{\text{МЕ}} = 6232$ кВт; $n = 131$ об/мин, работающим на винт фиксированного шага.

В табл. 3 и на рис. 2 приводятся показатели двигателя 6S42MC при работе по эксплуатационной винтовой характеристике.

Таблица 2

К определению EEOI балкера DWT = 30 000 т

Даты	Масса топлива, израсходованного за сутки, т				D, миль за сутки	V, узлы	m _{cargo} , т	EEOI, г CO ₂ /т·миля
	ГД	ВД	ВК	FC				
20–21.07.12	14,5	2,0	1,8	18,3	292	11,9	22 000	9,13
22–23.07.12	13,7	2,0	1,9	17,6	292,5	11,0	22 000	8,765
24–25.07.12	14,85	2,05	1,8	18,7	294	11,85	22 000	9,27
26–27.07.12	14,4	2,0	1,8	18,2	294,5	11,6	22 000	9,005
28–29.07.12	14,05	2,0	1,85	17,9	288,5	11,5	22 000	9,085
30–31.07.12	14,05	2,0	1,85	17,9	287,5	11,6	22 000	9,07
1–2.08.12	14,15	2,0	1,8	17,85	292	11,5	22 000	9,04
1–4.08.12	14,4	2,0	1,75	18,15	296	11,75	22 000	8,93
5–6.08.12	14,75	2,0	1,75	18,5	294,5	11,75	22 000	9,155
7–8.08.12	14,45	2,0	1,8	18,25	293	11,6	22 000	9,075
9–10.08.12	14,15	2,0	1,8	17,95	295	11,35	22 000	8,865
11.08.12	14,6	2,0	1,9	18,5	297	11,9	22 000	9,08
Среднее за рейс	14,33	2,04	1,81	18,18	292,9	11,6	22000	9,04

ГД — главный двигатель; ВД — вспомогательный двигатель; ВК — вспомогательный котел.

Таблица 3

Изменение показателей СЭУ балкера DWT = 30 000 т

Показатель	Режимы винтовой характеристики				
	1	2	3	4	5
$P_{\text{МЕ}}$, кВт	5522	4156	3105	2758	1385
n , об/мин	130,8	118,8	108,0	103,8	82,4
$CF_{\text{МЕ}}$, кг/ч	1005	744	559	502	266
$b_{\text{МЕ}}$, г/кВт·ч	182,0	179,0	180,0	182,0	192,0
$CF_{\text{АВ}}$, кг/ч	85				
$CF_{\text{ВК}}$, кг/ч	75				
CF , кг/ч	1165	904	719	662	426
V , узлы	14,0	12,7	11,6	11,1	8,8
g_v , кг/миля	83,2	71,2	62,0	59,6	48,4
EEOI, г CO ₂ /т·миля	12,12	10,37	9,04	8,68	7,05

Текущие значения эксплуатационного показателя энергоэффективности в табл. 2 рассчитаны по формуле

$$EEOI = \frac{FC \cdot C_F}{m_{\text{cargo}} \cdot D} = \frac{FC \cdot 3,206 \cdot 10^6}{22\,000 \cdot D} = 145,7 \frac{FC}{D}$$

Среднее значение EEOI за весь период рейса составляет 9,04 г CO₂/т·миля.

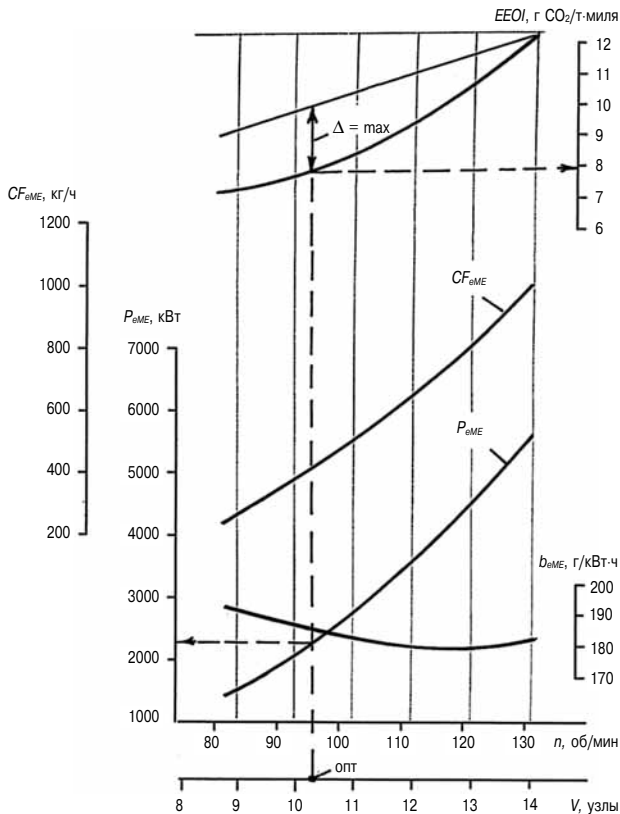


Рис. 2. Изменение показателей дизеля 6S42MC при работе по эксплуатационной винтовой характеристике

Значение базового конструктивного коэффициента энергоэффективности для балкера определим по формуле $EEDI_{БАЗ} = a \cdot (DWT)^{-c} = 961,79 \cdot 30\,000^{-0,477} = 7,04$ г CO_2 /т-миля [5].

Разность $EEOI - EEDI = 9,04 - 7,04 = 2,0$ г CO_2 /т-милю.

Доля топлива, расходуемая главным двигателем $X_0 = 0,863$; относительная оптимальная скорость $\bar{V}_{opt} = 0,73$; абсолютная оптимальная скорость $V_{opt} = 10,2$ узла.

Как видно из рис. 2, оптимальной скорости хода соответствует эффективная мощность $P_{eme} = 2250$ кВт, что составляет 36 % от номинальной мощности двигателя и 41 % от эксплуатационной мощности на полном ходу. В точке оптимума $EEOI_{opt} = 7,9$ г CO_2 /т-милю. В абсолютном исчислении снижение по сравнению с полным ходом составляет 4,22 г CO_2 /т-милю, в относительном — 35 %.

На оптимальном режиме $EEOI_{opt} - EEDI = 7,9 - 7,04 = 0,86$ г CO_2 /т-милю.

Таким образом, использование режимов с пониженной скоростью хода можно существенно повысить энергоэффективность судна и выброс углекислого газа в атмосферу.

Однако в этом вопросе недостаточно ограничиваться чисто техническими аспектами. Снижение скорости хода уменьшает провозную способ-

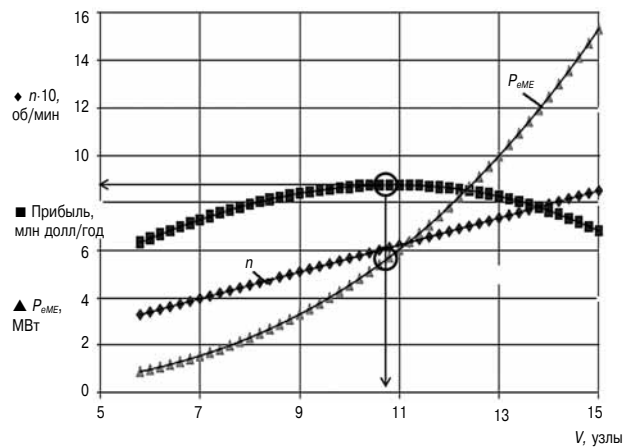


Рис. 3. Зависимость условной прибыли танкера дедвейтом 150 000 т от скорости хода

ность флота. Основной целью судоходных компаний является прибыль от флота. Этот вопрос рассмотрен в докладе [6], где проанализировано влияние различных факторов на прибыльность эксплуатации судна. Приведем основные результаты этого исследования.

На рис. 3 приведены результаты расчета «условной» прибыли танкера дедвейтом 150 000 т в зависимости от скорости хода судна при стоимости топлива 500 долларов за тонну. Максимум прибыли имеет место при скорости хода 10,7 узла. Оптимальная относительная скорость составляет 0,713 (при полной скорости судна 15 узлов). Мощность главного двигателя при этом составляет 36 % от номинальной мощности, т. е. в данном случае оптимальная скорость по прибыли совпадает с оптимальной скоростью по удельному путевому расходу топлива (см. рис. 3).

На рис. 4 приведены значения «условной» прибыли судна от стоимости топлива. Прямая линия соединяет точки оптимума по прибыли. Из рисунка видно, что повышение стоимости топлива приводит к снижению оптимальной по прибыли скорости хода. При стоимости топлива более 500 долларов за тонну оптимальные скорости хода по прибыли не могут быть реализованы вследствие ограничения минимальной мощности судна. При дешевом топливе оптимальная по прибыли скорость хода больше оптимальной скорости по относительному путевому расходу.

Многие другие факторы также влияют на величину оптимальной скорости по прибыли судна: тариф на перевозку груза; скольжение винта (погодный фактор); удельный эффективный расход топлива главного и вспомогательного двигателей (техническое состояние); затраты энергии на подогрев груза; стоимость цилиндрического масла; уровень навигационных расходов. Поэтому вопрос о выборе оптимальной скорости

Прибыль, млн долл/год

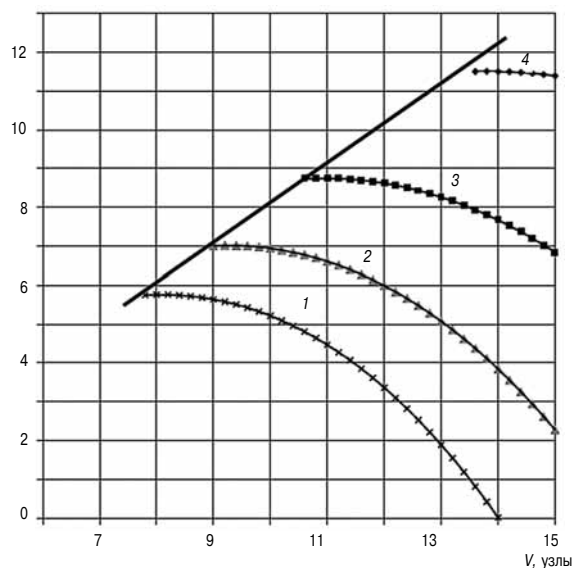


Рис. 4. Зависимость условной прибыли танкера дедевейтом 150 000 т от стоимости топлива (долл/год): 1 — 900; 2 — 700; 3 — 500; 4 — 300

хода судна решается путем постоянного мониторинга работы флота.

Выводы

1. Минимизация удельного путевого расхода за счет снижения скорости судна обеспечивает наименьшее значение эксплуатационного показателя энергоэффективности судна.

2. Ограничение минимальной длительной мощности главного двигателя на уровне 35–40 % от номинальной мощности соответствует скорости хода судна, составляющей 71 % от полной скорости хода.

3. Снижение эксплуатационного показателя энергоэффективности при минимальной скорости хода в зависимости от расхода топлива на вспомогательные нужды составляет 30–40 %.

4. Для достижения максимально возможного снижения показателя *EEOI* рекомендуется уста-

новить минимально допустимую мощность главного двигателя в соответствии с инструкцией по его эксплуатации.

5. Снижение скорости хода судов с целью минимизации выбросов в атмосферу уменьшает провозную способность флота. Исследования, выполненные ОАО «СОВКОМФЛОТ», показали, что при существующих ценах на топливо (500–700 долл./т) и средних значениях других влияющих факторов режим работы судна с оптимальной скоростью хода по удельному путевому расходу топлива обеспечивает максимальную прибыль при существенном снижении вредных выбросов на единицу транспортной работы. Ограничивающим фактором при этом является снижение эффективной мощности главного двигателя.

6. На примере поиска оптимальных эксплуатационных режимов движения судов показана актуальность исследований по оптимизации рабочих параметров судовых дизелей на режимах малых мощностей.

Литература

1. Камкин С.В., Лемещенко А.Л., Пунда А.С. Повышение экономичности судовых дизелей. — СПб.: Судостроение, 1992. — 176 с.

2. MARPOL 73/78 ANNEX VI, Chapter 4 adopted July 2011.

3. Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships, resolution MEPC.212 (63), 2012.

4. Guidelines for the development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP), resolution MEPC.213 (63), 2012.

5. Guidelines for calculation of reference lines for use with the Energy Efficiency Design Index (EEDI), resolution MEPC.215 (63), 2012.

6. Калинин О.Д. «Совкомфлот - Юником»: Опыт работы и новые разработки по энергоэффективности. Материалы семинара «Энергетическая эффективность судна». Санкт-Петербург, 24 октября 2012. Электронный ресурс <http://www.gma.ru/#/news/rus/n1351159739982>: