

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО ИНДЕКСА  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДНА EEOI ПРИ ПЛАВАНИИ НА  
ВОЛНЕНИИ

В международном судоходстве в целом позитивно воспринято введенные Международной морской организацией (International Maritime Organization, IMO) специальных требований по регулированию специфической проблемы – повышению энергетической эффективности судов. Авторитетные в судоходной отрасли организации, в частности, Институт судовых брокеров (Великобритания, г. Лондон – Institute of Chartering Shipbrokers, ICS), уверены [0, 0], что строительство новых судов с учетом конструктивного индекса энергоэффективности *EEDI* и их дальнейшая эксплуатация в соответствии с судовым планом его обеспечения SEEMP позволят сохранять судоходство наиболее экологичным и экономически эффективным на мировом транспортном рынке.

По оценке IMO [0] общая доля эмиссии CO<sub>2</sub> от международного морского и внутреннего судоходства в общей глобальной системе всех отраслей промышленности (по данным 2007 г.) составляет 3,3 %.

В данной работе целью исследования является определение операционного коэффициента (индекса) энергетической эффективности *EEOI*, по аналогии с проектным *EEDI*, что напрямую связано с необходимостью учета изменения условий плавания судна в течение рейса – направление и интенсивность ветра и волнения, курсового угла встречи волн, прохождения проливов и участков, на которых может ощущаться влияние мелководья на посадку и характеристики ходкости судна, маневровые операции и т.п.

При этом расчетная формула для *EEOI<sub>i</sub>* на участке перехода с определенными квазистационарными условиями плавания может быть записана в виде:

$$EEOI_i = \frac{\sum E_{ГД}^{CO_2} + \sum E_{ДГ}^{CO_2} - \sum \Delta E_u^{CO_2}}{f_i \cdot Capacity \cdot v_i \cdot f_{wi}}, \quad (1)$$

где  $\sum E_{ГД}^{CO_2}$  – суммарная эмиссия CO<sub>2</sub> всех главных двигателей;  
 $\sum E_{ДГ}^{CO_2}$  – суммарная эмиссия CO<sub>2</sub> всех вспомогательных двигателей, дизель-генераторов;  $-\sum \Delta E_u^{CO_2}$  – суммарное уменьшение эмиссии

CO<sub>2</sub> за счет применения инновационных устройств и механизмов, уменьшающих вредные выбросы в атмосферу;  $f_i$  – фактор влияния ледового усиления на мощность; *Capacity* – дедвейт для грузовых судов или валовая вместимость, для пассажирских судов, т;  $v_i$  – скорость судна на данном участке перехода, узлы;  $f_{wi}$  – фактор влияния внешних условий плавания на скорость судна в условиях прохождения данного участка.

Таким образом, на каждом из этапов рейса судна по каждому району перехода  $A_i$ , для которых условия движения квазистационарны, значения *EEOI* будут различны, а значение фактора влияния внешних условий плавания на скорость судна  $f_{wi}$  должно быть определено для конкретных условий прохождения каждого участка.

Эмиссия CO<sub>2</sub> судового энергетического оборудования (главных и вспомогательных двигателей) в общем виде определяется как произведение эффективной мощности  $P$  ( $P = N_e$ ), конверсионного фактора  $C_F$  и удельного эффективного расхода топлива *SFC* ( $SFC = b_e$ ) с учётом фактора влияния ледового усиления корпуса судна  $f_j$ :

$$E^{CO_2} = f_j P C_F SFC. \quad (2)$$

Известно, что

$$N_e = \frac{Rv}{\eta_D \eta_p}; \quad (3)$$

где  $R$  – полное сопротивление движению судна;  $v$  – скорость движения судна;  $\eta_D$  – пропульсивный КПД;  $\eta_p$  – КПД гребного винта.

Также

$$b_e = \frac{B_{\text{ч}}}{N_e}, \quad (4)$$

где  $B_{\text{ч}}$  – часовой расход топлива.

Это означает, что наиболее существенное влияние на величину численного значения эмиссии CO<sub>2</sub> главного двигателя оказывают сопротивление движению судна, эффективная мощность и скорость движения судна.

Расчет полного сопротивления движению судна для различных условий плавания в зависимости от курсового угла встречи волн создаёт основу для получения численных результатов и серий кривых  $R = R(v, h_{3\%}, \varphi_w)$  [0], а следовательно и  $N_e = N_e(v, h_{3\%}, \varphi_w)$ ,  $b_e = b_e(v, h_{3\%}, \varphi_w)$ . Такая работа была выполнена для судов серии "Измаил", эксплуатирующихся в Украинском Дунайском пароходстве для следующих расчётных условий плавания (табл. 1).

Таблица 1

Расчётные условия плавания для морского участка движения

№	Интенсивность волнения, баллы	$h_{3\%}$ , м	Сила ветра, баллы	$v_{вт}$ , м/с
1	1	0,25	3	5
2	3	0,75	4	7
3	3 ... 4	1,25	5	9
4	4	1,75	6	11

Основные характеристики судов серии "Измаил" и расчётные характеристики элементов судовой энергетической установки, входящих в схему расчёта конструктивного индекса энергоэффективности  $EEDI$ , приведены в работе [0].

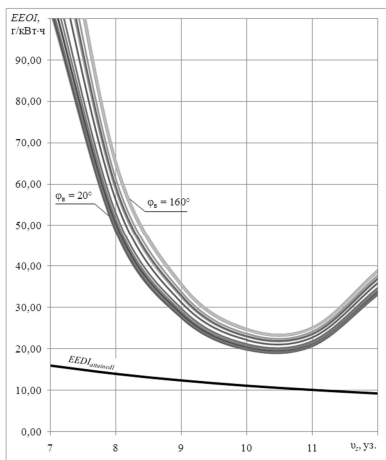
В результате последовательного выполнения алгоритма определения операционного индекса энергоэффективности для эксплуатационного диапазона скоростей и условий плавания построена серия графиков зависимости  $EEOI$  для возможных участков маршрута движения судна.

Рассмотрим подробнее результаты для самых сложных по алгоритму из всех возможных участков движения – морских, для которых предусматривается потенциальная возможность выполнения рейса в условиях волнения различной интенсивности во всём диапазоне значений курсового угла встречи волн  $\varphi_v$  (рис. 1).

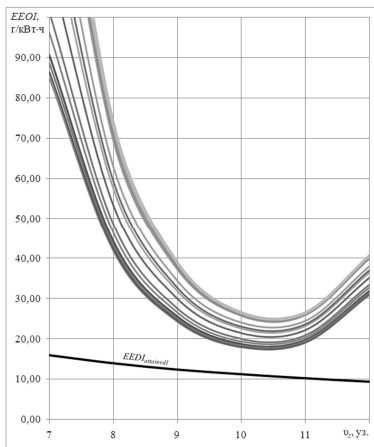
На рис. 1 чёрная наклонная линия соответствует зависимости достигаемого конструктивного индекса энергоэффективности  $EEDI_{attained}$ ; цветные линии –  $EEOI$  в зависимости от скорости для различных значений курсового угла встречи волн  $\varphi_v$  от 0 до 180° с интервалом  $\Delta\varphi_v = 10^\circ$ . Очевидно, что для судов типа "Измаил" при одинаковом значении скорости минимальным значениям  $EEOI$  соответствует значение  $\varphi_v = 20^\circ$ , максимальным –  $\varphi_v = 150 \dots 160^\circ$ . Это объясняется формой надводной части основного корпуса судна, расположением и величиной парусности палубных сооружений, надстроек, рубки. Характеристики парусности (площадь и плечо) имеют максимальные значения для этого типа судов именно при указанных значениях  $\varphi_v$ , что обуславливает максимальное значение силы сопротивления движению судна при  $\varphi_v = 20^\circ$  и к минимальному при  $\varphi_v = 150 \dots 160^\circ$ .

Отметим, что для кривых  $EEOI(v_s, \varphi_v)$  на кривых рис. 1 характерно наличие минимума, определяющего скоростной режим максимальной энергоэффективности, что может быть применимо как для целей выполнения судового плана энергоэффективности SEEMP, так и для планирования и прогнозирования рейса судна, составления рекомен-

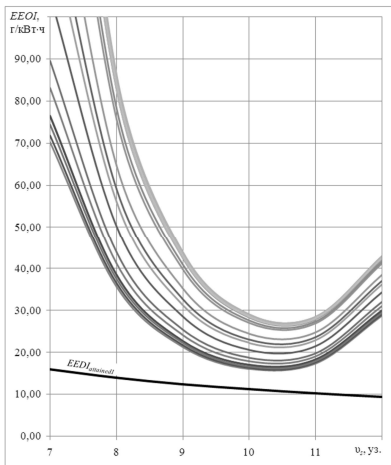
даций судовому экипажу по режиму эксплуатации пропульсивного комплекса.



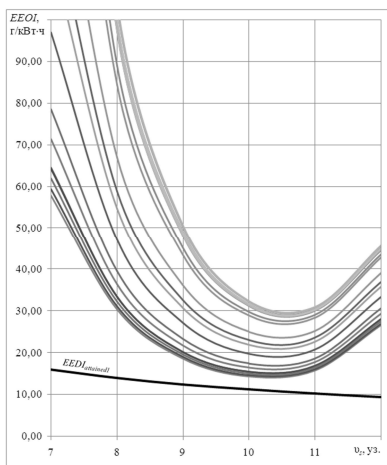
а)



б)



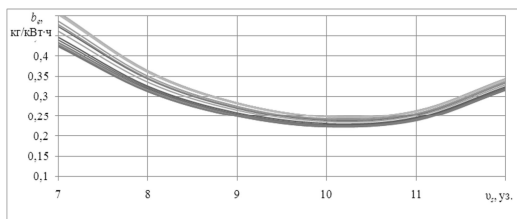
в)



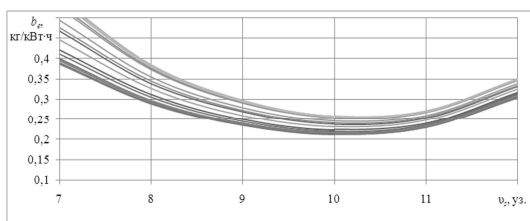
г)

Рис. 1. Зависимость  $EEOI$  на морских участках от скорости движения судна для различных значений курсового угла встречи волн  $\varphi_w$  (регулятор нагрузки работает; включён валогенератор; расчётные условия волнения по табл. 1: а – № 1; б – № 2; в – № 3; г – № 4)

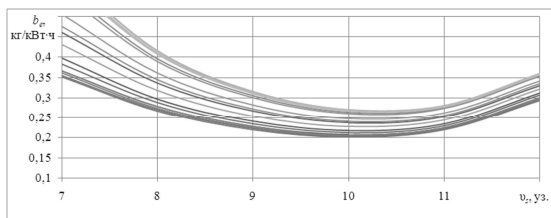
Наличие такого минимума объясняется формой кривых  $b_e(v, h_{3\%}, \varphi_w)$ . На рис. 2 приведены результаты для условий волнения, принятых для рис. 1.



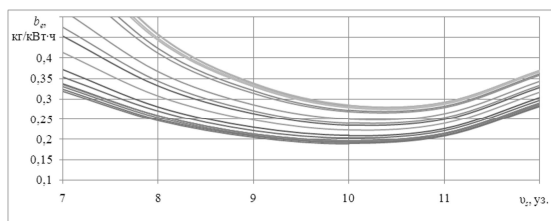
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Зависимости  $b_e(v, h_{3\%}, \varphi_w)$  на морских участках от скорости движения судна для различных значений курсового угла встречи волн  $\varphi_w$  (расчётные условия волнения по табл. 3.2: а – №2; б – № 4; в – № 6; г – №8)

Если рассматривать отдельные составляющие  $EEOI$  по формулам (0), (0), очевидно, что наибольшее влияние курсовой угол встречи  $\varphi_w$  оказывает на значение эмиссии  $CO_2$  главного двигателя, а также на транспортную работу (знаменатель формулы (0)) – в случае, если для её расчёта применяется следующая формула для фактора влияния внешних условий плавания  $f_w [0]$ :

$$f_w(h_{3\%}, \varphi_w) = \frac{b_{e0}}{b_e(v, h_{3\%}, \varphi_w)}, \quad (5)$$

где  $b_e(v, h_{3\%}, \varphi_w)$  – удельный эффективный расход топлива в эксплуатационных условиях с учетом интенсивности волнения и курсового угла встречи волн;  $b_{e0}$  – нормативное (базовое) значение удельного эффективного расхода топлива, принятое для данного судна (на тихой воде).

Для судов "Измаил" разброс значений транспортной работы за счет применения формы (0) коэффициента  $f_w$  составляет  $A_{тр} = 2 \dots 40\%$  в зависимости от гидрометеорологических условий плавания, направления и интенсивности волнения. При этом относительная доля составляющих эмиссии  $CO_2$  остается постоянной во всех случаях (рис. 3).

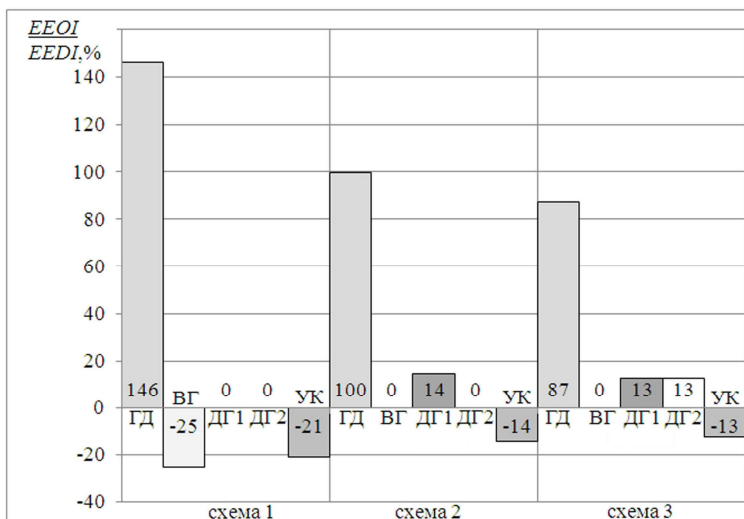


Рис. 3. Соотношение значений эмиссии  $CO_2$ , производимой элементами СЭУ теплохода "Измаил" при различных схемах включения: ГД – главный двигатель; ВГ – валогенератор; ДГ1, ДГ2 – дизельгенераторы; УК – утилизационный котёл

На рис. 3 предусмотрено три схемы работы элементов СЭУ, определяющих значение операционного индекса энергоэффективности *EEOI*:

схема 1 – судно движется при работающем валогенераторе (ВГ), при этом дизельгенераторы ДГ1 и ДГ2 не работают; работает утилизационный котёл УК;

схема 2 – судно движется при не работающем валогенераторе ВГ, при работающем одном дизельгенераторе ДГ1; работает утилизационный котёл УК;

схема 3 – судно движется при не работающем валогенераторе, при работающих дизельгенераторах ДГ1 и ДГ2; работает утилизационный котёл УК.

При этом эмиссию  $\text{CO}_2$  создаёт ГД и дизельгенераторы ДГ1 и ДГ2. Валогенератор ВГ и утилизационный котёл УК относятся к оборудованию, работающему по инновационным технологиям, способствующим снижению эмиссии  $\text{CO}_2$ .

В результате анализа изведённых результатов можно сделать вывод, что операционный индекс энергоэффективности может быть определён для различных условий плавания судна, для волнения различной интенсивности, а при известных преобладающих ветроволновых режимах в районе эксплуатации судна по сезонам заранее построенные зависимости  $EEOI = EEOI(v, h_{3\%}, \varphi_w)$  могут служить не только инструментом для выполнения судового плана энергоэффективности, но и инструментом прогнозирования, а также инструментом определения оптимальной скорости движения судна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасенко, Т.В. Определение сопротивления движению судна при движении на волнении с учетом курсового угла. // Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, 2013. – Вип. 3 (39).

2. Тарасенко, Т.В. Повышение энергоэффективности судов с ВРШ при эксплуатации на коротких морских линиях [Электронный ресурс] / Т.В.Тарасенко // Судовые энергетические установки. – 2014. – Вып. 32. – С. 5 – 11. – Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/seu\\_2014\\_32\\_3.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/seu_2014_32_3.pdf).

3. Hinchliffe, P. Regulatory measures on efficiency at IMO and UNFCCC. A view from shipping industry [Электронный ресурс] / Peter Hinchliffe. – Ship Efficiency Conference. – Hamburg, 2011. – Режим доступа: <http://www.ship-efficiency.org/onTEAM/pdf/PPTHinchliffe.pdf>.

4. Hinchliffe, P. Regulatory steps to ship efficiency [Электронный ресурс] / Peter Hinchliffe. – Ship Efficiency Conference. – Hamburg, 2011. – Режим доступа: <http://www.ship-efficiency.org/onTEAM/pdf/01%20>

Hinchliffe\_Chamber%20of%20Shipping.pdf.

5. Second IMO GHG Study 2009 [Электронный ресурс]. – IMO, 2009. – 240 р. – Режим доступа: [http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data\\_id=27795](http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data_id=27795).