

УДК 629.123

ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДИКАТОРОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ

Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Залож В.И.

PRINCIPLES OF DETERMINATION OF ENERGY EFFICIENCY INDICATORS FOR INLAND NAVIGATION VESSELS

Suvorov P., Tarasenko T., Zalozh V.

Рассмотрены вопросы идентификации индикаторов энергоэффективности во внутреннем судоходстве. Проведен анализ индексов энергоэффективности, применяемых Международной морской организацией в международном морском судоходстве. Особое внимание авторы уделили вопросам определения скорости движения судна в условиях фарватера переменной ограниченной глубины на речных участках, анализу неопределенностей и факторов, оказывающих влияние на значение скорости.

Ключевые слова: энергоэффективность, мелководье, скорость, экономичность, расход, индекс, топливо.

Введение. Исследования Международной морской организации (ИМО) [2, 3] и поправки, внесенные в Международную Конвенцию МАРПОЛ, создали основу для применения в речном судоходстве индексов энергоэффективности по тем же принципам, которые заложены ИМО для оценки энергоэффективности в международном морском судоходстве (программы Европейского Союза The Innovative Danube Vessel, PROMINENT), что ожидаемо привело к проблемам, с которыми сталкиваются исследователи при поиске оптимальных скоростей движения по внутренним водным путям, а именно, при определении степени влияния путевых навигационных условий, и, прежде всего, ограниченности фарватера по глубине.

Постановка проблемы. Если при оценке влияния навигационных условий в форме вычисления индекса энергоэффективности ЕЕІ по ИМО это учтено путем введения погодного коэффициента f_w , то такая упрощенная аппроксимация абсолютно не пригодна для судов в речных условиях движения по фарватеру со сложным продольным профилем, постоянно изменяющимся уровнем воды и уклоном водной поверхности. Если принять за базовый некий средний уровень воды, то глубина под килем судна в

речных условиях движения в общем виде будет описываться как:

$$H = f(S, \Delta H_p, I), \quad (1)$$

где H – глубина под килем, м; S – расстояние от устья по фарватеру, м; ΔH_p – изменение уровня воды в реке по данным водопостов, м; I – уклон водной поверхности реки.

Известно, что влияние мелководья начинает проявляться при глубине, определяемой по формуле Г. Е. Павленко [4], м:

$$H \leq 4T + \frac{3v^2}{g} \quad (2)$$

Логично, что скорость движения судна при неизменном значении полезной тяги P_e при движении на речном участке также будет находиться в зависимости от перечисленных факторов:

$$v = f(S, \Delta H_p, I) \quad (3)$$

При докритических скоростях движения судна на мелководье характерной особенностью кривой сопротивления:

$$R = a_{11}v^2 \quad (4)$$

и кривой винтовой характеристики:

$$N_p = a_{21}v^3 \quad (5)$$

или

$$N_e = a_{22}n^3, \quad (6)$$

(N_p , N_e – соответственно мощности на гребном валу и эффективная мощность двигателей, n – частота вращения гребного вала) является то, что их наклон

при малых значениях числа Фруда по глубине ($Fr_H = 0,60$) резко возрастает, а вблизи критической скорости становится почти вертикальной. Резкий рост сопротивления при выходе на мелководный участок и существенное при этом снижение пропульсивного коэффициента, резко снижает скорость движения судна (рис. 1), приводит к ощутимой перегрузке двигателей и увеличению расхода топлива; особенно это характерно для «тяжелых» составов (рис.2).

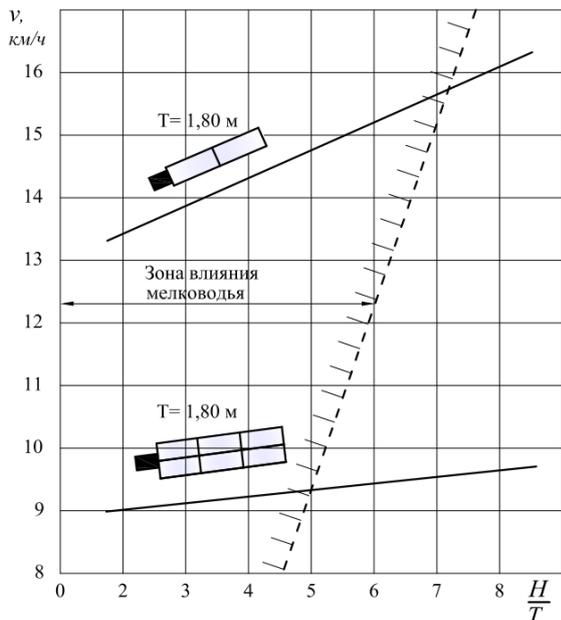


Рис. 1. Влияние мелководья на режим движения составов

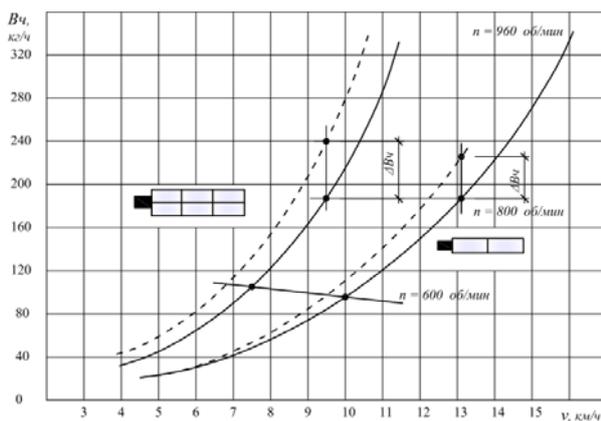


Рис. 2. Изменение часового расхода топлива B_q при выходе каравана на мелководный участок

Анализ последних исследований и публикаций. Выбору оптимальной скорости движения судов (составов) в условиях мелководья посвящено значительное число исследований, при этом в качестве критерия оптимальности принимались различные критерии. В работе Г.Е. Павленко [4] в качестве критерия оптимальности принято отвлеченное число P , которое представляет

собой отношение приращения сопротивления к соответствующему приращению скорости движения судна:

$$P = \frac{dR/R}{dv/v} \quad (7)$$

Тем самым, в этой форме учитывается только гидромеханические характеристики судна, а изменение мощности и расхода топлива (как основного фактора энергоэффективности) в явном виде в данном критерии не приводится

В работе Ю.П. Петрова [1] в качестве критерия оптимальности принят расход топлива и задача оптимального управления формулируется как: «определить закон движения судна по фарватеру с переменной глубиной при условии, что судно должно пройти некоторое расстояние за определенное время с минимальным расходом топлива».

Цель статьи. Применение индикаторов энергоэффективности для определения рациональной скорости движения, а также показателей экономичности и экологичности в условиях фарватера переменной ограниченной глубины.

Для определения оптимальной скорости решается вариационная задача, которая сводится к определению максимума функционала:

$$B = \int_0^{t_0} b(v, \frac{H}{T}) dt, \quad (8)$$

где $\frac{H}{T}$ – относительная глубина;

$b(v, \frac{H}{T})$ – мгновенный расход топлива.

Недостатком данного метода также является то, что при этом не приведено в явном виде значения мощности и частота вращения двигателей а также не учитывается заданное время рейса и общая себестоимость перевозки. Соответственно, это должно найти отражение и в общей постановке задачи оценки энергоэффективности.

С точки зрения времени рейса возможен следующий подход.

Примем, что средняя скорость судна в течение предполагаемого рейса определяется через среднюю частоту вращения вала двигателя:

$$v_{cp} = a_{24}(1 - a_{25})n_{cp}, \quad (9)$$

где a_{25} – коэффициент, учитывающий снижение частоты вращения вала от точки, в которой $\bar{B}_q(\bar{v}) < 1$ (шлюзование, маневровые работы).

Если представить суммарный путь $\sum S_{pi}$, состоящий из S_{pi} участков со скоростями течения v_{pi}

, и задаться в первом приближении ориентировочным временем рейса τ_p , то начальная частота вращения вала двигателя на первом участке:

$$n_1 = \frac{\sum S_{pi} - v_{\tau_{cp}}}{a_{24}(1 - a_{25})}, \quad (10)$$

где

$$v_{\tau_{cp}} = \sum v_{\tau_i} / \sum i \quad (11)$$

Определим условное время рейса, приняв на каждом участке частоту вращения вала дизеля n_i :

$$\sum \tau_{i(1)} = \sum \frac{S_{pi}}{[a_{24}(1 - a_{25})]n_i + v_{\tau_i}} \quad (12)$$

Если $\sum \tau_{i(1)} = \tau_p$, то значение n_1 может быть принято за начальную частоту вращения вала дизеля на первом участке.

Считая, что работа дизеля происходит по номинальной винтовой характеристике, для значения n_1 определим величину соответствующей мощности N_{e1} . По известным n_1 и N_{e1} найдем величину часового расхода топлива, которую примем за норму на первом участке $B_{ч1}$.

Исходя из $B_{ч1}$, определим среднюю (базовую) скорость хода судна на первом участке

$$v_{\sigma 1} = \sqrt[3]{B_{ч1} / b_R} \quad (13)$$

Скорость хода судна на последующих участках может быть определена по аналогичной схеме, при этом очередной участок принимается за первоначальный.

Представленная схема выбора v_{σ} во многом соответствует другим методикам определения экономической скорости хода судна.

Тем самым, вопросы энергоэффективности судов внутреннего плавания имеют более сложное поле составляющих, пренебрегать которыми недопустимо.

Результаты исследований. Все теоретические работы по определению режимов движения, включая вышеуказанные, рассматривают в своих рассуждениях одиночное судно с неизменяемыми геометрическими характеристиками. Однако, около 70% всего судоходства на Дунае составляют перевозки большегрузными караванами до 15 тыс. тонн с различными схемами построения состава в зависимости от участка движения и текущих условий плавания.

Проводимые в Украинском Дунайском пароходстве в 1995–2003 годах систематические испытания по определению рациональных режимов движения составов учитывали известные

исследования, но придерживались своей оригинальной системы, заключающейся в следующем:

1. Дистанция предполагаемого рейса разбивается на отдельные участки, имеющие примерно одинаковые характеристики, а именно, постоянные глубины и скорости течения.

2. На выбранных участках имеются достаточно длинные участки с постоянной глубиной, что дает возможность количественно учесть разовые выходы на мелководье, где изменяется часовой расход топлива (рис.2).

3. Для выбранных участков при известном весе состава Q и измеряемых значениях фактической скорости v_{ϕ} , расходу топлива B времени полного хода $Z_{пх}$, времени работы других потребителей топлива (отдельно вспомогательных дизель-генераторов и котла) определялись величины:

а) расход топлива на 1 км движения, кг/км:

$$B = \frac{G}{L}, \quad (14)$$

б) часовая производительность, т/час:

$$\frac{Q}{Z_{пх}}, \quad (15)$$

в) интенсивность провозной способности:

$$\alpha = \frac{Q}{t_{пх}} \cdot v_{\phi}. \quad (16)$$

Для проведения подобных испытаний был выбран достаточно стабильный с точки зрения сезонных колебаний глубин и скорости течения участок Дуная (Видин–Мохач) длиной 657 км и с караванами с однотипным толкачом типа «Запорожье»: $L = 32,6$ м; $B = 11,0$ м; $H = 2,6$ м; $d = 1,75$ м; главные двигатели марки SBV6M628 фирмы Deutz, ФРГ, диаметр цилиндра $D = 240$ мм, ход поршня $S = 280$ мм, $N_e = 2 \times 910$ кВт при $n = 1000$ мин⁻¹ – с целью выяснения общих закономерностей изменения расхода топлива и приведенных показателей производительности. На основании последних имеется возможность вычисления себестоимости перевозки как необходимый дополнительный элемент к энергоэффективности судов внутреннего плавания (табл.).

Анализируя полученные кривые видно, что повышение эффективности грузоперевозок возможно только увеличивая скорость движения состава против течения с общим количеством груза не более 8,0 тыс. тонн, при этом снижается расход топлива на 1 км пути (см. кривую $\frac{G}{L}$) и его стоимость (см. кривую C) при значительном возрастании интенсивной провозной способности (см. кривую α).

Таблица

Результаты проведённых испытаний на участке Дуная (Видин – Мохач) при ходе вверх.

№ п/п	Название судна	Кол-во груза Q , т	Средняя скорость $v_{ср}$, км/ч	Время рейса					Расход топлива в тоннах	Расход топлива в кг/км	Стоимость топлива на 1 км, в дол.	Производительность, т/ч	Интенсивность провозной способности	Дата рейса
				$Z_{ПВ}$, ч	$Z_{ДГ}$, ч	$Z_{МАН}$, ч	$Z_{СГ}$, ч	$Z_{КОП}$, ч						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1.	Златоуст	8796	7,56	86 ²⁵	114 ⁵⁰	22 ²⁵	5 ³⁰	-	29,847	45,4	9	101	764	18.08-23.08
2.	Звёздный	9008,8	6,1	108	272	47	117	-	40,532	61,7	12,3	83,4	509	24.07-03.08
3.	Звёздный	7353	5,5	119,5	160	14 ²⁵	26 ²⁰	160	42,750	65	13	61,5	338	05.04-11.04
4.	Златоуст	8538	6,7	98	140	8	34	70	32,541	49,5	9,9	87	584	07.04-12.04
5.	Задонск	9157	6,44	102	115	11	2	115	35,900	54,6	11	89,8	578	29.04-04.05
6.	Знаменка	2233	5,35	122 ⁴⁵	128	5 ¹⁵	0 ²⁰	125	21,000	32	6,4	18,2	97	27.04-02.05
7.	Загорск	8733	5,65	116 ¹⁵	147	7 ⁴⁰	22 ⁰⁵	-	31,250	47,6	9,5	75	424	14.06-29.06
8.	Запорожье	7320	6.3	104	126	11	11	-	31,850	48,5	9,7	69,7	439	07.09-13.09
9.	Задонск	6039	7,6	96	215	11	118	180	29,697	45,2	9	70	534	27.08-05.09

Где $Z_{ПВ}$ – часы полного хода, ч;
 G – расход топлива в кг на участке;
 L – расстояние в км (657 км);
 α – интенсивность провозной способности;
 $\alpha = \frac{Q}{Z_{ПВ}} \cdot v_{ф}$
 $v_{ф}$ – фактическая скорость прохождения участка;
 Q – количество груза в тоннах, т;
 c – цена одной тонны топлива в долларах, $c=200$ \$.

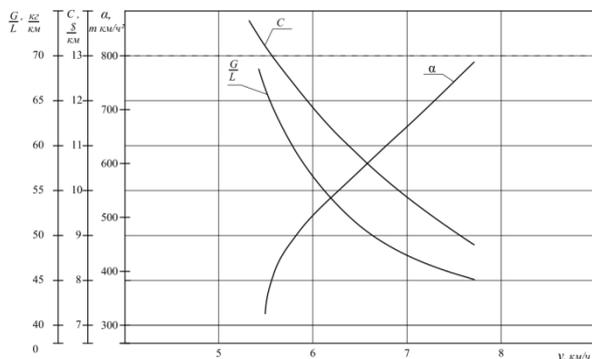


Рис. 3. Графическое представление результатов проведённых испытаний на участке Дуная (Видин – Мохач) при ходе вверх.

Однако, оптимальными можно считать скорости для судов типа т/х «Запорожье» 6,5...8,0 км/ч при движении вверх.

Выводы. На основании вышеизложенного следуют выводы.

1. Движение судов внутреннего плавания в речных условиях связано с наличием значительно большего количества неопределенностей, чем в морском судоходстве.

2. Оценка неопределенностей, влияющих на основные характеристики движения судна в условиях рек, является необходимым условием формирования подхода к оценке энергоэффективности судов внутреннего плавания. Подход, предложенный ИМО для оценки

энергоэффективности в морском судоходстве, не соответствует данной позиции.

3. Показатели финансовой и топливной экономичности (и их сопоставление) могут быть применимы для оценки энергоэффективности судов внутреннего плавания в качестве дополнительных.

Литература

- Петров, Ю.Е. Оптимальные регуляторы судовых силовых установок [Текст] / Ю.Е.Петров. – Л.: Судостроение, 1966. – 121 с.
- Second IMO GHG Study 2009 [Электронный ресурс]. – IMO, 2009. – 240 p. – Режим доступа 24.04.18: http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data_id=27795.
- Study on tests and trials of the Energy Efficiency Design Index as developed by the IMO [Электронный ресурс]: Report for project 6543 / Deltamarin, Finland, 2011. – Режим доступа 24.04.18: <http://www.emsa.europa.eu/tags/download/1517/1310/23.html>.
- Оптимальный гидромеханический комплекс сухогрузного теплохода для р. Дунай [Текст]: отчёт о НИР / Новосибирский НИИ водного транспорта; рук. Павленко В.Г.; исп. Деревянченко Н.Т., Литвинов А.И., Мащикова И.Ю. – Новосибирск: НИИВТ, 1992. – 101 с.

References

- Petrov, Ju.E. Optimal'nye reguljatory sudovyh silovyh ustanovok [Tekst] / Ju.E.Petrov. – L.: Sudostroenie, 1966. – 121 s.

2. Second IMO GHG Study 2009 [Jelektronnyj resurs]. – IMO, 2009. – 240 p. – Rezhim dostupa 24.04.18 http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data_id=27795.
3. Study on tests and trials of the Energy Efficiency Design Index as developed by the IMO [Jelektronnyj resurs]: Report for project 6543 / Deltamarin, Finland, 2011. – Rezhim dostupa 24.04.18: <http://www.emsa.europa.eu/tags/download/1517/1310/23.html>.
4. Optimal'nyj gidromehaničeskij kompleks suhogruznogo teplohoda dlja r. Dunaj [Tekst]: otchjot o NIR / Novosibirskij NII vodnogo transporta; ruk. Pavlenko V.G.; isp. Derevjan-chenko N.T., Litvinov A.I., Mashhikova I.Ju. – Novosibirsk: NIIVT, 1992. – 101 s.

Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Залож В.І.
Принципи визначення індикаторів енергоефективності для суден внутрішнього плавання.

Розглянуті питання ідентифікації індикаторів енергоефективності у внутрішньому суднопластві. Виконано аналіз індексів енергоефективності, які застосовуються Міжнародною морською організацією у міжнародному морському суднопластві. Особливу увагу автори приділили питанням визначення швидкості руху судна в умовах фарватеру змінної обмеженої глибини на річкових ділянках, аналізу невизначеностей та факторів, які впливають на значення швидкості.

Ключові слова: енергоефективність, мілководдя, швидкість, економічність, витрата, індекс, паливо.

Suvorov P., Tarasenko T., Zalozh V. Principles of determination of energy efficiency indicators for inland navigation vessels.

The issues of identification of energy efficiency indicators in inland navigation are considered. An analysis was carried out for the energy efficiency indexes applied by the International Maritime Organization in international maritime navigation. Particular attention was paid to the issues of determining the speed of the vessel under the conditions of the variable-depth waterway in river areas, the analysis of uncertainties and factors affecting the speed value.

Keywords: energy efficiency, shallow water, speed, economy, consumption, index, fuel.

Суворов П.С. – д.т.н., професор, академік Транспортної академії України, e-mail: psuvorbud@mail.ru

Тарасенко Т.В. – к.т.н., доцент кафедри, завідувач кафедри Інженерних дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», e-mail: sergeysunnysat@gmail.com

Залож В.І. – старший викладач кафедри Інженерних дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», e-mail: zalozh@ukr.net

Рецензент: д.т.н., проф. **Горбунов М.І.**

Стаття подана 15.03.2018.