

## Оценка факторов, определяющих энергоэффективность судов внутреннего плавания

Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Залож В.И.  
Дунайский институт НУ «ОМА», Измаил, Украина

### Evaluation of the main factors that determine the energy efficiency of inland navigation vessels

Suvorov P., Tarasenko T., Zalozh V.  
Danube Institute of NU "Odessa Maritime Academy", Izmail, Ukraine

*Аннотация – Расчетно-экспериментальными методами определено наличие характерных точек в зависимостях индексов энергоэффективности от основных определяющих факторов, отнесенных к скорости составов, при которых имеет место резкий рост ЕЕИ. Показано, что доверительные диапазоны этих скоростей могут совпадать, что дает возможность корректно сформулировать задание поиска рациональных скоростей движения по критериям допустимого значения ЕЕИ и себестоимости рейса.*

*Abstract – Based on the experimental data on fuel consumption for various methods of barge-towed compounds forming, an evaluation of the energy efficiency index curves in function from the movement speed of various in form and mass characteristics ships compositions was performed. The possibility of their application to determine the rational speed of movement, as well as the economics and environmental indicators in the conditions of a variable-depth waterway is considered.*

Активность Международной морской организации (ИМО) и признанные реальные объемы снижения выбросов CO<sub>2</sub> в результате внедрения мероприятий по улучшению показателей энергоэффективности на морском транспорте, а также углубление изучения

основных факторов влияния на энергоэффективность морских судов и их систематизация, изложенная в Резолюции МЕРС.282(70), принятой 28.10.2016 создает основу для постановки и решения аналогичной задачи применения показателей энергоэффективности и для судов внутреннего плавания.

Данная задача постепенно находит свое отражение в проектах развития судоходства на конвенциональных (Рейн, Дунай, Сава, Мозель) внутренних водных путях (ВВП) Европы, прежде всего, в проектах экологического направления. Значение этих предварительных шагов необходимо считать положительным, имея в виду, что на ВВП стран Европейского Союза ежегодно перевозится свыше 550 млн. т грузов.

Как известно, Резолюция МЕРС.282(70) представляет собой руководство по разработке судового плана управления энергоэффективностью (*SEEMP – Ship Energy Efficiency Management Plan*), в котором предложены подходы к управлению экологичностью и экономичностью работы, а также возможные пути улучшения общих эксплуатационных показателей судна.

Следует отметить, что основные факторы влияния на энергоэффективность, изложенные в Резолюции, применимы и для судов внутреннего плавания, но в различной степени «весомости».

В общем виде формула операционного индекса энергоэффективности *EEOI* [0]:

$$EEOI = \frac{N_e \cdot SFC \cdot C_F}{Dw \cdot v}, \quad (1)$$

где  $N_e$  – эффективная мощность главного двигателя (ГД), кВт;  $SFC$  – удельный расход топлива, г/(кВт·ч);  $C_F$  – коэффициент выбросов  $CO_2$  (безразмерный конверсионный фактор между потреблением топлива и выбросом  $CO_2$ ),  $C_F = T_{CO_2} / T_{топлива}$ ;  $Dw$  – дедвейт, т;  $v$  – скорость судна, км/ч. Числитель в этой формуле представляет собой выбросы  $CO_2$ , г, а знаменатель – транспортную работу, т·миля.

Впервые понятие «*Energy Efficiency*» применительно к судам внутреннего плавания для дунайского судоходства было использовано в проекте «*The Innovative Danube Vessel*» (2012 – 2015 г.) Европейского Союза в виде аналогичного индекса *EEI*, ( $г_{CO_2}/т·км$ ), т.е. в виде удельной массы выброса  $CO_2$  на т/километр дистанции движения судна. В последующей программе *PROMINENT* (начало в 2015 г., запланированное окончание – в 2018 г.) используется тот же аналог индекса энергоэффективности. Специфический характер применения индекса в речных условиях плавания заключается в том, что в обеих

программах в комплексе *EEI* рассматривается совместно с индексом себестоимости перевозки  $t$  груза в виде индекса *SCE* (*Specific Cost Efficiency*, €/т), как величина, связанная с основным переменным эксплуатационным расходом, а именно, потреблением топлива (расходы на топливо на судах внутреннего плавания начиная с 2004 г. составляют 45 ... 55 % суммы переменных расходов).

В обеих программах определяющим фактором влияния на указанные индексы приводится фактор мелководья, а именно критическое значение отношения глубины фарватера к осадке судна  $H/d$ . С данным фактором можно согласиться, но при этом следует рассмотреть некоторые особенности дунайского судоходства, отличающиеся от других конвенциональных ВВП Европы.

В вышеупомянутых программах в качестве объекта исследования приводятся одиночные суда (превалирующее в Рейнском судоходстве) по группам *fleet families*, а толкаемые составы приведены к группе «судно-толкач + одна баржа класса Европа II», т.е. практически рассуждения приводятся для абстрактного одиночного судна шириной 11,45 м.

В то же время, на Среднем и Нижнем Дунае около 60 % (в Украинском Дунайском пароходстве – свыше 90 %) перевозок осуществляется большегрузными толкаемыми составами по следующим схемам:

толкач ( $2 \times 995$  кВт или  $2 \times 1249$ ) + 9 барж (общая длина состава  $L = 275 \dots 285$  м, ширина  $B = 34,2$  м);

толкач ( $2 \times 772$  кВт) + 6 барж (общая длина состава  $L = 270 \dots 280$  м, ширина  $B = 22,8$  м).

На Верхнем Дунае в благоприятных навигационных условиях также применяется схема:

толкач ( $2 \times 772$  кВт) + 4 баржи (общая длина состава  $L = 185 \dots 195$  м, ширина  $B = 22,8$  м).

При наличии такой устоявшейся практики построения составов (караванов) актуальным является, кроме влияния фактора мелководья, исследование в определении индекса *EEI* фактора различных схем построения составов.

На рис. 1 приведены некоторые из применяющихся схем построения составов, для которых были проведены исследования в 1990 – 2003 г. в Украинском Дунайском пароходстве по поиску рациональных режимов движения в различных условиях плавания [0, 0].

Особенностью проведенных испытаний явилась уникальная возможность определения тяги пропульсивного комплекса при различном построении составов при одинаковых глубинах с толкачем

«Знаменка» (серия «Запорожье») с ГД марки SBV6M628 фирмы Deutz, ФРГ, диаметр цилиндра  $D = 240$  мм, ход поршня  $S = 280$  мм,  $2 \times 910$  кВт при  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup>.

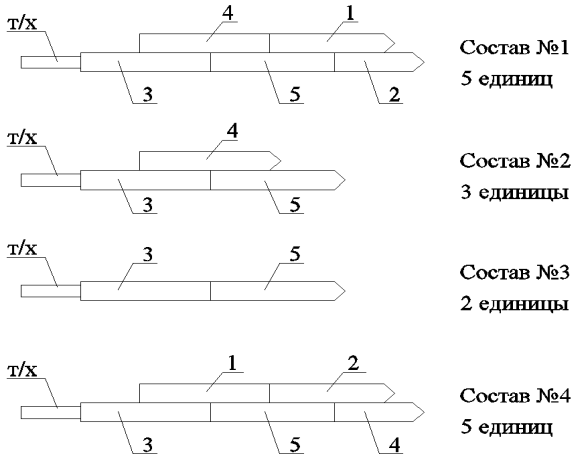


Рис. 1. Схемы построения составов (караванов): 1 – осадка  $d_1 = 2,0$  м, количество груза  $D_{гр1} = 895,2$  т; 2 –  $d_2 = 2,0$  м,  $D_{гр2} = 888,2$  т; 3 –  $d_3 = 2,3$  м,  $D_{гр3} = 1409,3$  т; 4 –  $d_4 = 2,0$  м,  $D_{гр4} = 1159,7$  т; 5 –  $d_5 = 2,3$  м,  $D_{гр5} = 1409,3$  т

Особое внимание при проведении испытаний [0] было уделено точности измерений часового расхода топлива  $V_{ч}$ , кг/ч, и скорости  $v$ , км/ч.

Результаты испытаний подтверждают принципиально известный факт, что форма построения каравана и его масса существенно влияют на расход топлива при одинаковой глубине под килем (рис. 2). Даже простая перестановка баржи в составе одной массы (№ 1 и № 4) вызывает достаточно существенное для данной мощности изменение часового расхода топлива (при скорости  $v = 10$  км/ч разница составила  $\Delta V_{ч} \approx 27$  кг/ч).

Ввиду того, что в гидродинамическом смысле форма построения состава не может быть выделена в прямом виде, а оценивается в любом случае значением эквивалентного сопротивления, выведем значение индекса энергоэффективности в зависимости от скорости состава. При этом применим метод, предложенный В.А. Лесюковым [0].

Изменение индекса энергоэффективности  $EEI$  от скорости составов № 1 – 4 имеет вид (рис. 3). Соответственно наиболее оптимальной

формой построения каравана является вариант, при котором достигается минимальное значение индекса операционной энергоэффективности.

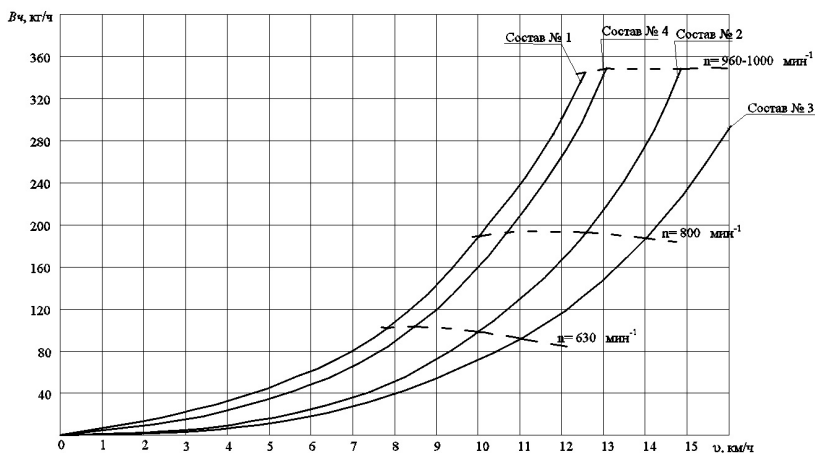


Рис. 2. Зависимости часового расхода топлива от скорости при различных схемах построения составов

В качестве критерия применим геометрический подход к приведенным на рис. 3 зависимостям  $EEl = f(v)$ . Для каждой кривой может быть определена точка, соответствующая началу участка, на котором приращение значений индекса энергоэффективности значительно превышает приращение скорости. Этот участок будет соответствовать диапазону скоростей  $v = (0,8 \dots 1,0)v_{кр}$ , где  $v_{кр} = \sqrt{gH}$ ,  $H$  – глубина фарватера (рис. 4).

Исходя из указанного подхода для составов № 1 и 4 такое значение скорости определится в пределах доверительного диапазона  $v \approx 9,5 \dots 10$  км/ч, для составов № 2 и 3 –  $v \approx 11 \dots 11,5$  км/ч.

Исходя из практики судоходства на ВВП логичным можно признать вывод, сделанный в программе «*The Innovative Danube Vessel*» об определяющем влиянии условий плавания на оба используемых индекса в ряду всех остальных факторов, включая проектные и технологические: «*Ship design and technology will not compensate for insufficient waterway conditions*» – вывод о том, что ни проект судна, ни применяемые технологии не компенсируют недостаточные (по глубине фарватера) условия плавания.

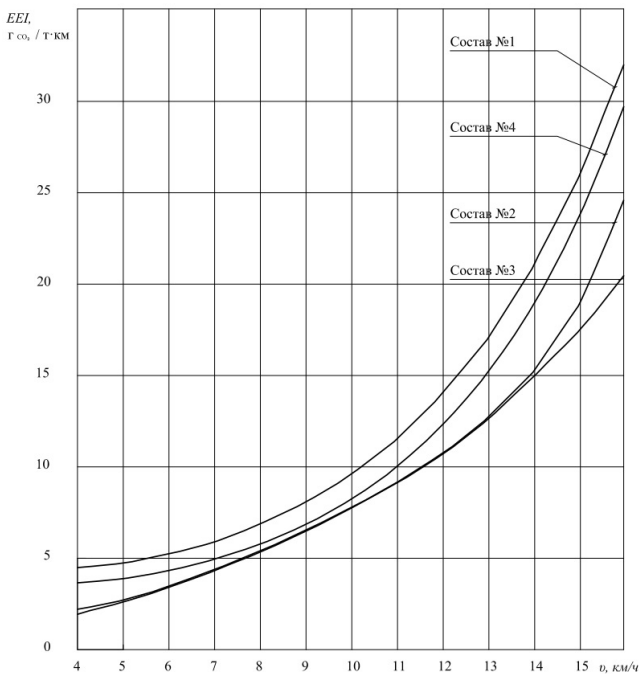


Рис. 3. Изменение индекса EEOI в зависимости от скорости хода

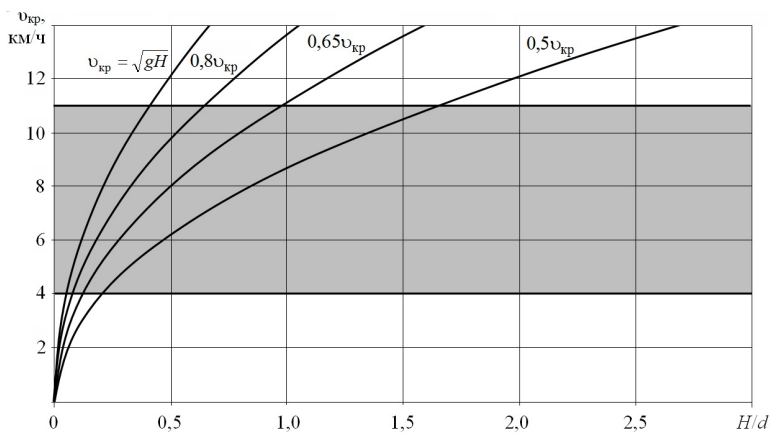


Рис. 4. Эксплуатационный диапазон скоростей движения речных составов

Фактор определяющего влияния мелководья на приведенные индексы рассматривается как основной в обеих перечисленных программах Европейского Союза.

Вопросы влияния глубины под килем в условиях мелководья на скорость судна и его посадку подробно изложены в [0], где авторы предлагают оценивать глубину фарватера, при которой оно начинает проявляться, по формуле:

$$H < 4d + \frac{3v^2}{g}, \quad (2)$$

где  $H$  – глубина, м;  $d$  – средняя осадка судна, м;  $v$  – скорость судна, м/с;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Исходя из реальных осадок составов на Дунае с учётом сезонных колебаний, можно считать, что дунайский флот в основном работает в условиях систематического мелководья.

Малый запас воды под килем в данных условиях представляет собой реальную навигационную опасность, кроме того, поведение состава на мелководье существенно отличается от поведения на глубокой воде.

К основным отличительным особенностям поведения состава на мелководье можно отнести ухудшение управляемости, увеличение тормозного пути, дополнительное проседание и падение скорости движения при тех же энергетических затратах.

Данные испытаний составов при различных отношениях  $H/d$  приведены на рис. 5, на котором очевидно фактическое снижение скорости состава относительно воды по испытываемым судам в зависимости от отношения  $H/d$ , которое в процессе испытаний изменялось в диапазоне от 2 до 8.

При этом форма изменения индексов  $EEOI$  для различных глубин имеет вид, приведенный на рис. 6.

Из полученного следует вывод, что влияние отношения  $H/d$  на  $EEOI$  начинается с  $H/d \approx 2,75$  для тяжелых составов, тем самым рациональное значение скорости по значению индекса энергоэффективности будет составлять для этих судов величину  $v = 9,2 \dots 10,8 \text{ км/ч}$ , что входит в диапазон скоростей по минимуму  $EEOI$  в зависимости от формы состава.

Применяемый совместно с  $EEOI$  индекс себестоимости  $SCE$  (€/т) будет определяться прежде всего расходом топлива за рейс, который в свою очередь будет назначен для обеспечения рациональной скорости в пределах доверительного диапазона.

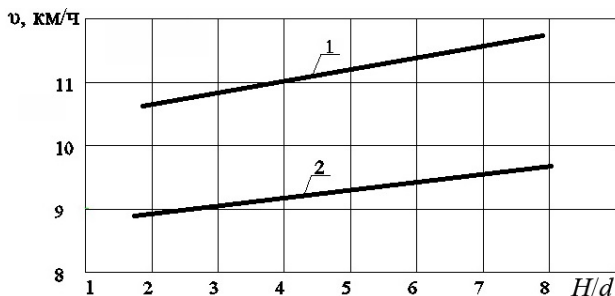


Рис. 5. Изменение скорости хода судов относительно воды в зависимости от отношения глубины фарватера реки  $H$  к осадке судна  $d$ : 1 – состав №1 при  $n = 960 \text{ мин}^{-1}$ ; 2 – состав №1 при  $n = 800 \text{ мин}^{-1}$

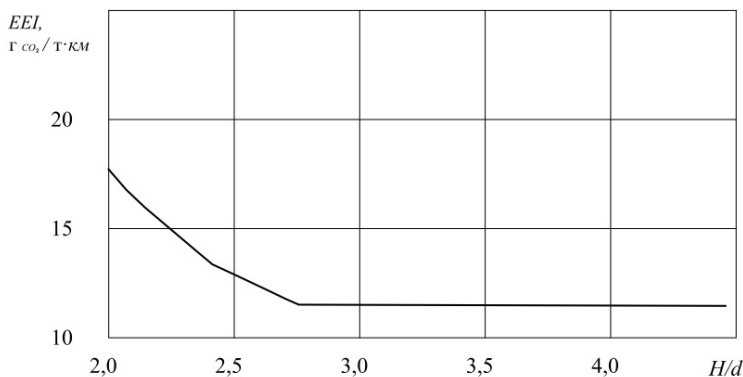


Рис. 6. Изменение индекса  $EEI$  в зависимости от отношения глубины фарватера реки  $H$  к осадке  $d$

#### Выводы.

1. Начавшиеся работы по применению показателей энергоэффективности для конвенциональных ВВП Европы используют в качестве определяющего фактора отношение глубины фарватера к осадке  $H/d$ . В то же время для дунайского судоходства вторым определяющим фактором является форма построения состава.

2. Расчетно-экспериментальными методами определено наличие характерных точек в зависимостях  $EEI$  от указанных факторов, отнесенных к скорости составов, при которых имеет место резкий рост  $EEI$ .



3. Показано, что доверительные диапазоны этих скоростей могут совпадать, что дает возможность корректно сформулировать задание поиска рациональных скоростей движения по критериям допускаемого значения  $EEI$  и себестоимости рейса.

## ЛИТЕРАТУРА

## REFERENCES

1. Лесюков, В.А. Теория и устройство судов внутреннего плавания: учебник для вузов водн. трансп. / В.А.Лесюков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1982. – 303 с.

2. Суворов, П.С. Динамика двигателя в судовом пропульсивном комплексе / П.С.Суворов. – Одесса: ОНМА, 2004. – 304 с.

3. Суворов, П.С. Идентификация режимов работы главных двигателей на мелководье / П.С. Суворов, Л.Н. Карпов, Б.П. Мельников // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – Одесса: ОНМА. – 1999. – Вып. 3. – С. 143 – 154.

4. Тарасенко, Т.В. Повышение энергоэффективности судов с ВРШ при эксплуатации на коротких морских линиях // Судовые энергетические установки. – 2014. – Вып. 32. – С. 5 – 11.

5. Ходкость и управляемость судов: учебник для вузов / В.Ф.Бавин, В.И.Зайков, В.Г.Павленко, Л.Б.Сандлер. – М.: Транспорт, 1991. – 397 с.