

## Оценка энергоэффективности для условий навигационных неопределенностей во внутреннем судоходстве

Суворов П.С.<sup>1</sup>, Тарасенко Т.В.<sup>2</sup>, Залож В.И.<sup>3</sup>  
Дунайский институт НУ «ОМА», Измаил, Украина  
pjotr.suvorov@danubecommission.org<sup>1</sup>, sergeysunnysat@gmail.com<sup>2</sup>, zalogh@ukr.net<sup>3</sup>

## Evaluation of energy efficiency for conditions of navigational uncertainty in the inland navigation

Suvorov P.<sup>1</sup>, Tarasenko T.<sup>2</sup>, Zalozh V.<sup>3</sup>  
Danube Institute of NU "Odessa Maritime Academy", Izmail, Ukraine  
pjotr.suvorov@danubecommission.org<sup>1</sup>, sergeysunnysat@gmail.com<sup>2</sup>, zalogh@ukr.net<sup>3</sup>

*Анотація – Наведена оцінка інтенсивності дунайського судноплавства у порівнянні з інтенсивністю судноплавства на основних магістралях внутрішніх водних шляхів Європи, проаналізовані характеристики суден та караванів суден, які працюють на різних частинах, з урахуванням гідрологічних особливостей та забезпеченості прохідних глибин європейських внутрішніх водних шляхів та водного шляху ріки Дунай. Показане значення впливу навігаційних умов на характеристики економічності та екологічності роботи суден у внутрішньому дунайському судноплавстві, що пов'язано з постійними змінами режимів роботи пропульсивних комплексів.*

*Abstract – The intensity estimation of Danube shipping is given in comparison with the intensity of navigation on the main European inland waterways, analyzed the characteristics of ships and caravans of ships operating on different parts of the river, considering on the hydrological features and availability of both inland waterways and river Danube.*

DOI: 10.31653/1819-3293-2019-1-25-90-100

Расходы на топливо на судах внутреннего плавания в среднем составляют 50 ... 60 % суммы всех переменных расходов; соответственно, исследования проблемы уменьшения этих расходов традиционно

уделяется большое внимание и стимулируется проведение обстоятельных исследований.

Сформулированное в Приложении VI к Конвенции MARPOL 73/78 и в соответственных резолюциях Международной морской организации (ИМО) понятие энергоэффективности придают этим исследованиям дополнительный смысл, а именно через возможное внедрение на внутренних водных путях (ВВП) Европы специальных показателей энергоэффективности, в частности аналогичного ИМО индекса *EEI*,  $\text{гCO}_2/\text{т}\cdot\text{км}$ , т.е. в виде удельной массы выброса  $\text{CO}_2$  на тоннокилометр транспортной работы судна, стремятся не только снизить расходы, но и уровень выбросов в атмосферу в выпускных газах двигателей.

Соответственно, мероприятия по ограничению вредных выбросов в пересчете к  $\text{CO}_2$  (далее и по отдельным компонентам выбросов в выпускных газах) приобрели дополнительный формализованный оттенок и активно поддерживаются Европейской Комиссией.

Следует отметить специфический характер применения индекса *EEI* для речных условий плавания, а именно, в совместном рассмотрении с индексом себестоимости перевозок груза *SCE* (*Specific Cost Efficiency* – удельная эффективность расходов (затрат)), €/т, как величины, связанной с основными переменными расходами судна, а именно потреблением топлива и состоянием фрахтового рынка [1].

Доля перевозок на ВВП Европы в общем распределении грузопотоков определяется активностью центров накопления и распределения грузов, а также политикой прибрежных государств по использованию ВПП в национальной экономике и международной торговле, и имеет величину (в странах ЕС) от 0,6 до 38 % (Германия) и 34 % (Нидерланды) [2].

Существуют оценочные данные транспортной продукции в т·км на основных магистралях ВВП Европы, в частности на 2010 г. системы «Рейн-Майн-Дунай» (рис. 1), на основании чего транспортную работу можно оценить для реки Дунай – величина в 22 ... 25 млрд. т·км является достаточно стабильной. Имеются прогнозы, что ориентировочное значение транспортной работы для ВВП Европы в предстоящее десятилетие может составить величину свыше 200 млрд. т·км.

Основная плотность движения имеет место у центров накопления и распределения с величиной годового грузооборота (данные 2017 г.):

порт Дуйсбург – 52, 2 млн. т;

Роттердам (по речным судам) – 158 млн. т;

Антверпен (по речным судам) – 103 млн. т.

В основе оценки плотности движения судов и соотношения спроса и предложения (*demand/supply*) применяется термин «активный

флот», движение судов т.е. количество судов, имеющих свидетельства классификационных обществ на годность к плаванию и совершающих коммерческие рейсы.

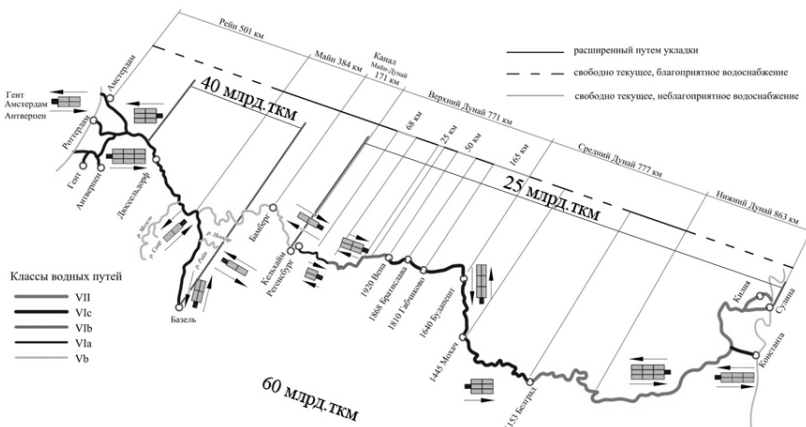


Рис. 1. Схема распределения плотности транспортной продукции

На ВВП Европы работают около 10 000 единиц флота с дизельными энергетическими установками, при этом основную часть составляют одиночные самоходные суда, классифицируемые прежде всего по длине корпуса: меньше 55 м, диапазон 55... 110 м, больше 110 м:

стандартное судно внутреннего плавания (так называемое «европейское судно») имеет длину 110 м и ширину 11,4 м и при осадке 3,5 м имеет грузоподъемность около 3000 т;

«большое европейское судно» имеет размерения 135×11,4 м и при осадке 3,5 м грузоподъемность 5000 т (имеются суда длиной 135 м, с увеличенной шириной 17 м и 22 м).

Эти суда составляют основу судоходства по Рейну, в то время как на Дунае только 11 % активного флота – это самоходные суда.

Как показали исследования, значение соотношения одиночных самоходных судов и судов-толкачей для большегрузных караванов имеет серьезное значение при формировании общего подхода к оценке энергоэффективности судов, работающих на ВВП.

Принимается, что все известные способы снижения выбросов CO<sub>2</sub>, рекомендуемые ИМО для морских судов, применимы и для судов внутреннего плавания [1]. Для ВВП влияние навигационных условий имеет определяющее значение.

Целью работы является оценка влияния навигационных условий при определении показателей энергоэффективности во внутреннем судоходстве.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

сопоставление показателей влияния навигационных условий;

выбор наиболее рационального способа управления энергоэффективностью при влиянии навигационных условий для судов внутреннего плавания.

Если для одиночных судов (средняя расчетная мощность всех самоходных одиночных судов на ВВП Европы около 555 кВт) пропорции в процентном отношении указанных в [1] способов можно считать примерно одинаковыми, то для судов-толкачей в составах большегрузных караванов (на Дунае около 60 % процентов перевозок осуществляется большегрузными до 15 тыс. т составами) эти пропорции имеют значительные отличия.

Причины этого лежат в гидродинамике движения состава (приведенного к условному корпусу классов *fleet families*) в стесненном фарватере и при постоянно изменяющейся (в основном малой) глубине с малыми скоростями. При этом, в процессе движения на большие (до 2000 км) дистанции требуется переформирование караванов с учётом класса водного пути в соответствии с Европейским соглашением о важнейших внутренних водных путях международного значения [3] (табл. 1).

Соответственно, состав при движении будет переформировываться в соответствии со схемой разделения водного пути на классы (рис. 1) и с другой скоростью, с учетом местных предписаний для конкретно-го участка.

В частности, на Дунае принята следующая классификация участков (табл. 2) [3].

Соответственно, переформирование составов является прежде всего рекомендуемым, но на отдельных участках обязательным условием согласно местным (региональным) Правилам плавания, в частности для Дуная согласно рис. 2.

Путевое переформирование каравана определяет изменение его общей винтовой характеристики и при выходе на мелководный участок – изменение скорости движения и, соответственно, расхода топлива; при этом главные двигатели работают на частичном режиме при утяжеленном винте [4].

Таблица 1

## Характеристики составов









Класс водного пути	Толкаемые составы: общие характеристики				
	Схема состава	Максимальная длина $L$ , м	Максимальная ширина $B$ , м	Рабочая осадка в грузу $d$ , м	Дедвейт, т
IV		85	9,5	2,50...2,80	1250...1450
Va		95...110	11,4	2,50...4,50	1600...3000
Vb		172...185	11,4	2,50...4,50	3200...6000
VIa		95...110	22,8	2,50...4,50	3200...6000
VIb		185...195	22,8	2,50...4,50	6400...12000
VIc		270...280	22,8	2,50...4,50	9600...18000
		195...200	33,0...34,2	2,50...4,50	9600...18000
VII		275...285	33,0...34,2	2,50...4,50	14500...27000

Таблица 2

## Классификация участков разделения водного пути Дуная

№ п/п	Участок	Класс
1	Кельхейм – Регенсбург	Vb
2	Регенсбург – Вена	VIb
3	Вена – Белград	VIc
4	Белград – Сулина	VII

Движение на конкретном участке также не может быть стабильным с точки зрения режима работы двигателей и соответственно расхода топлива ввиду периодического путевого прохождения различных перекатов, которые достаточно устойчивы в навигационный период (рис. 3).

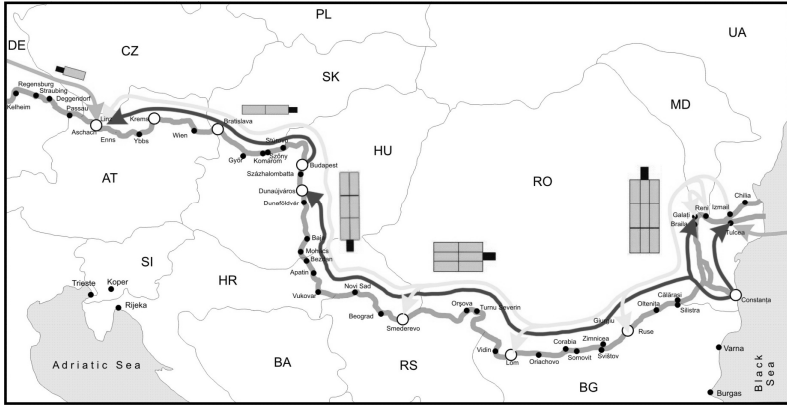


Рис. 2. Схема переформирования состава при движении по Дунаю

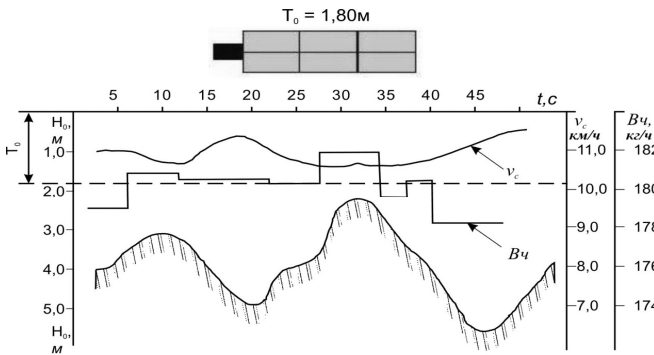


Рис. 3. Схема прохода переката составом из шести барж

В особые периоды летне-осеннего мелководья и снижения глубин на отдельных участках (рис. 4) дополнительно к переформированию составов необходимо приведение осадки к проходной величине путем применения специальной технологии паузки судов.

Систематическое мелководье (рис. 5), разделение судоходного пути на классы и, соответственно, сложный характер зависимостей годового выброса  $CO_2$  не укладывается в общие принципы определения индекса  $EEL$ ,  $\Gamma_{CO_2}/t \cdot км$ , определяемых для одиночных судов внутреннего плавания.

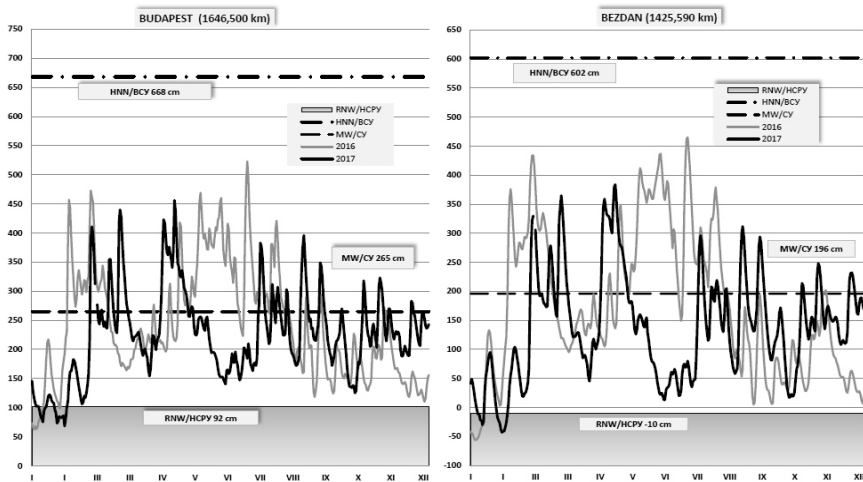


Рис. 4. Среднесуточные значения уровней воды для водомерных постов Среднего Дуная в 2016 и 2017 годах

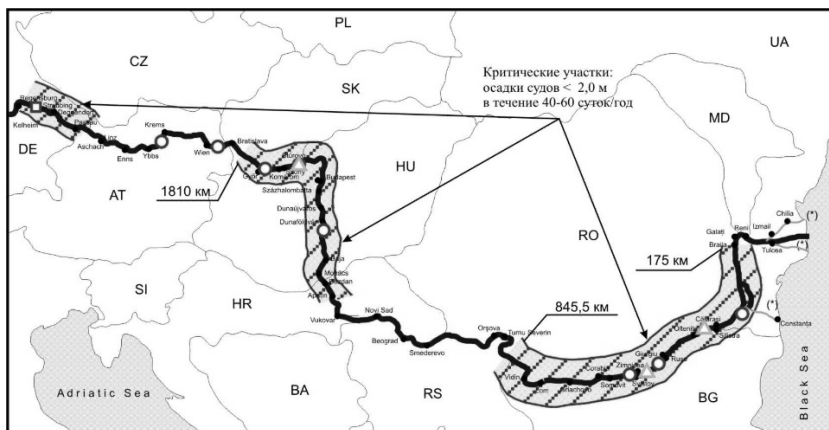


Рис. 5. Схема критических участков реки Дунай при фазе летне-осеннего мелководья

Европейская Экономическая Комиссия ООН (ЕЭК ООН, *UNESE*) рекомендует для судов внутреннего плавания применять для расчета затрат энергии и соответственного объема выбросов CO<sub>2</sub> модели *For*

*FITS* на базе исходных индексов, общих по смыслу для всех видов транспорта (рис. 6). Для судов внутреннего плавания в составе этих индексов рекомендуется рассматривать:

- расход топлива за год эксплуатации, т/год;
- стоимость топлива, €/год;
- количество перевезенного груза, т/год;
- себестоимость перевозки 1 т, €/т;
- количество вредных выбросов в пересчете к  $\text{CO}_2$ , отнесенное к выполненной транспортной работе,  $\text{г}_{\text{CO}_2}/\text{т}\cdot\text{км}$ .



Рис. 6. Модель *For FITS* Европейской экономической комиссии ООН

Текущий расход топлива в Украинском Дунайском пароходстве определяется специальной системой мониторинга топливоиспользования, которая основана на расчетном определении текущего и суммарного расхода топлива главными двигателями по результатам регистрации основных эксплуатационных параметров. Этим обеспечивается возможность регистрации и архивирования численных значений указанных параметров и предъявления расчетных показателей топливоиспользования (остатка топлива на борту с распределением по топливным цистернам и учетом израсходованного топлива, принятого и сданного с судна за заданный период эксплуатации).

Средняя стоимость бункерного топлива в портах Дуная коррелирует соответственно значению *Bunker Platts Rotterdam*, которая составила по *MGO* в первом квартале 2017 г. ( $Q_1$ ) – 464,1 долл. США/т, во втором ( $Q_2$ ) – 438,8 долл. США/т, в третьем ( $Q_3$ ) – 470,8 долл. США/т.

Стоимость бункерного топлива во втором и третьем кварталах 2017 г. находилась в пределах 575 ... 580 долл. США/т, в четвертом – 592 долл. США/т, что является определяющим для уровня фрахтовых



ставок на перевозки (как указано выше, расходы на топливо составляют от 50 до 60 % всех переменных судовых расходов).

Соответственно, стоимость бункерного топлива в 2017 г. возросла по отношению к средней стоимости в 2016 г. на 20,7 %, а в течение года с января по декабрь 2017 г. – на 15 %.

В 2017 г. индекс фрахтовых ставок на перевозки с учетом надбавок на рост стоимости бункерного топлива и надбавки за работу в мелководье в целом изменялся согласно табл. 3.

Таблица 3  
Изменение индекса фрахтовых ставок  $Q_1 - Q_4$  на перевозки по кварталам в 2017 году по сравнению с 2016 годом, %

Составляющие индекса	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$
Бункер	119	117	117	120
Фрахт	103	104	100	111

Соответственно себестоимость перевозки грузов в составах при среднем количестве перевезенного груза при стабильных судоходных условиях (март – август 2017 г.) без реформирования состава составов для состава из шести барж на дистанции 1800 км 14,6 ... 15,3 €/т.

Общая формула расхода топлива для отдельного участка с условно постоянными определенными навигационными условиями:

$$B_j = D \frac{N_j k_N b_e}{v_w + v_{Str}},$$

где  $B_j$  – общий расход топлива на  $j$ -ом участке, кг;  $D$  – длина  $j$ -го участка, км;  $N_j$  – установленная мощность, кВт;  $k_N$  – коэффициент использования мощности на  $j$ -ом участке;  $b_e$  – удельный эффективный расход топлива при мощности  $N_j$ , кг/кВт·ч;  $v_w$  – скорость относительно воды км/ч;  $v_{Str}$  – скорость течения км/ч.

Коэффициент использования мощности зависит от режимов движения: в условиях глубокой воды; в условиях мелководья; на свободном участке реки; на канале (короткий зарегулированный участок между шлюзами). Значение этого коэффициента также в значительной степени зависит от величины остаточного ресурса двигателей и технического состояния движительного комплекса, что определяется по показателям рабочего процесса (в УДП используется система контроля «Lautert») с оценкой состояния текущей винтовой характеристики по отношению к номинальной и ограничительной. Для основной мас-

сы судов Украинского Дунайского пароходства с возрастом 30 ... 35 лет его значение составляет в условиях:

глубокой воды 0,70 ... 0,75;

мелководья 0,60 ... 0,75.

При работе двигателей на частичном режиме, как основном эксплуатационном, имеет место снижение выбросов  $\text{CO}_2$  по отношению к величине, определенной для номинальной винтовой характеристики, что значительно ухудшает основные показатели рабочего процесса. Соответственно, этот фактор необходимо учитывать при выборе способа снижения выбросов.

Проведенными в Украинском Дунайском пароходстве исследованиями [5, 6] установлено, что для судов-толкачей толкаемых составов при работе на частичных характеристиках, как основных эксплуатационных, может быть достигнуто снижение выбросов  $\text{CO}_2$  на 10 ... 12 % путем уменьшения расхода топлива за счет рационального менеджмента: рациональным планированием рейса и оперативным управлением во время движения (оперативное переформирование состава, изменение скоростного режима) в зависимости от текущих навигационных условий. При этом важнейшим элементом выступает эффективное использование для прогнозирования движения оперативной информации локальных систем РИС (речные информационные службы; *RIS – River Information Services*).

По результатам исследования сделаны следующие выводы.

При выборе способов (технологий) управления энергоэффективностью необходимо учитывать влияние навигационных условий как определяющее в условиях их абсолютной нестабильности. Также должны учитываться возраст судна и текущее техническое состояние СЭУ. Оперативным менеджментом с использованием локальных систем РИС в сочетании с поддержкой технического состояния СЭУ можно добиться наибольшего повышения энергоэффективности судов внутреннего плавания.

#### ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Горб С.И. Мониторинг энергоэффективности судов // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2015. – Вып. 21. – Одесса: ОНМА. – С. 48 – 53.
2. Суворов, П. С. Оценка основных факторов, определяющих энергоэффективность судов внутреннего плавания [Текст] / П. С. Суворов, Т. В. Тарасенко, В. І. Залож // Автоматизация судовых технических

средств: научн.-техн. сб. – Одесса: ОНМА, 2017. – Вып. 23. – С. 132 – 135.

3. Европейское соглашение о важнейших внутренних водных путях международного значения СМВП / AGN ECE/TRANS/120/Rev.4)).

4. 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 – 155.

5. Суворов, П. С. Принципы определения индикаторов энергоэффективности для судов внутреннего плавания / П. С. Суворов, Т. В. Тарасенко, В. И. Залож // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2018. – № 2. – С. 203 – 207.

6. Суворов, П. С. О соотношении энергоэффективности и экологичности для судов внутреннего плавания / П. С. Суворов, Т. В. Тарасенко, В. И. Залож // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2019. – № 3 [251]. – С. 168 – 175.