

УДК 656.6-042.5/8:502/504

## О СООТНОШЕНИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ ДЛЯ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ

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

## ABOUT RATIO OF ENERGY EFFICIENCY AND ECOLOGICAL COMPATIBILITY FOR INLAND NAVIGATION VESSELS

Suvorov P., Tarasenko T., Zalozh V., Maksymov S.

*В проведенном исследовании рассмотрены вопросы нормирования вредных выбросов в атмосферу в судоходстве на европейских внутренних водных путях. Показаны отличия технологий перевозок в международном морском, европейском внутреннем и дунайском судоходстве. Выполнен анализ показателей энергоэффективности, установленных в международном морском судоходстве, а также особенностей их применения во внутреннем судоходстве. Определены принципы применения показателей энергоэффективности к оценке экологических показателей работы судов во внутреннем судоходстве с учетом специфики навигационных условий и других факторов, определяющих режимы работы судового propulsionного комплекса.*

*Таким подходом, в частности предлагается решить практическую задачу, сформулированную установлением нормативных ограничений по компонентам вредных выбросов, которые ставят в одинаковые условия судовладельцев различных по характеристикам и технологиям работы судов, работающих в различных навигационных условиях.*

*Современное состояние дунайского судоходства отличается недостаточной обеспеченностью навигационных условий, возрастным составом флота, а также спецификой самого флота – его способностью работать на протяжении всего Дуная (более 2000 км) при загрузке тяжелыми составами из судов самоходного флота. Такая специфика значительно отличает дунайское судоходство от судоходства по другим внутренним водным путям Европы, на которых круглогодично обеспечены проходные глубины, дальность переходов в десяток раз меньше, а работу осуществляют по большей части самоходные сухогрузные и наливные суда.*

*Следовательно, есть основания утверждать, что судовладельцы существующего дунайского тягового и самоходного флота без существенной его модернизации и обновления смогут исключительно управлять характеристиками энергоэффективности, показано соотношение характеристик энергоэффективности и экологичности и определены условия, в которых возможно достижение повышения энергоэффективности при одновременном снижении количества вредных выбросов в атмосферу.*

**Ключевые слова:** вредные выбросы, энергоэффективность, экологические показатели, судоходство, состав судов, толкач

**1. Введение.** Исследования в области применения в судоходстве на внутренних водных путях (ВВП) Европы общего понятия энергоэффективности, используемого в международном морском судоходстве, сформулированного в Приложении VI к Конвенции MARPOL 73/78 и в соответствующих резолюциях Международной морской организации (ИМО), выявили отдельные особенности в определении возможных технологий управления энергоэффективностью на судах внутреннего плавания.

Объемы перевозок грузов на ВВП Европы в последнее десятилетие колеблются около 550 млн. тонн в год и прогнозируется, что к 2030 году доля внутреннего судоходства в распределении грузопотоков Европы составит около 10%, при этом грузооборот составит около 240 млрд. тонно-километров при естественном резком росте объемов энергетических затрат. Соответственно, задача управления энергоэффективностью остается актуальной для внутреннего судоходства в целом и для дунайского – в частности.

**2. Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Проблемам поиска вариантов достижения максимальной экономии энергии (топлива) при безусловном обеспечении движения флота и, соответственно, снижении вредных выбросов в атмосферу, в частности CO<sub>2</sub>, посвящено значительное число исследований, существенно активизировавшихся с начала 2000-х гг. [4, 10, 11]. На текущий момент уже существуют сформировавшиеся основные мнения по фундаментальному решению этой проблемы техническими методами (при принятии за базу индекс *costs/benefit* типовой единицы стандартного проекта действующего судна с судовой энергетической установкой – СЭУ). Исходя из прогноза состояния рынка до 2020 г., технические методы обеспечения экономии энергоресурса судов внутреннего плавания, в основном применительно к новому флоту, приведены в табл. 1 [4].

Таблица 1

**Технические методы обеспечения экономии энергии судов внутреннего плавания**

Технический метод	Область внедрения	Экономия энергии	Окупаемость, лет
Дизель-электрическая установка	Новое судно	10%	10
Двухдвигательная установка типа «отец/сын»	Новое судно	10%	7...8
Трехдвигательная установка (пассажирские суда)	Новое судно	12%	6...7
Применение LNG (dual-fuel)	Новое судно	7...8%	8...9
Применение LNG	модернизация СЭУ	7...8%	12...15
Оптимизация обводов корпуса и винт в насадке	Новое судно	10%	3...4

Фактически все приведенные методы кардинального решения проблемы сведены к новому проектированию судов и соответственным увеличением капитальных вложений по отношению к базовому проекту судна.

После введения *IMO* методики оценки энергоэффективности, исследования для ВВП сфокусировались на поисках обоснования возможного конвенционального (или директивного) применения показателя энергоэффективности в виде аналогичного *IMO* индекса *EEI*,  $g_{CO_2}/tkm$ , т.е. в виде удельной массы вредных выбросов, приведенных к  $CO_2$ , на единицу транспортной работы (тоннокилометр, т·км) [9].

Слабость и неустойчивость рынка внутренних водных перевозок справедливо определили специфичность рассмотрения индекса *EEI* совместно 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.

С 2015 г. предпринимаются попытки найти логическую взаимосвязь понятия энергоэффективного судоходства (*energy-efficient navigation*) и сокращения вредных выбросов (*emission reduction*), рассмотренных как в отдельности, так и в их взаимосвязи, т.е. возникает ситуация, которая должна привести к применению новых технологий в СЭУ в судоходстве в целом и во внутреннем судоходстве ВВП Европы в частности [6].

Принципиально все возможные методы мониторинга энергоэффективности в соответствии с Приложением VI к Конвенции МАРПОЛ, применяемые для морских судов, находящихся в эксплуата-

ции [1], с определенными допущениями справедливы и для судов внутреннего плавания.

Вместе с тем, на ВВП Европы еще с середины 90-х годов начались серьезные исследования проблемы снижения не только  $CO_2$ , но и других вредных выбросов ( $CO$ ,  $HC$ ,  $NO_x$ ,  $PM$ ) в выпускных газах судовых двигателей, что значительно усложнило исследования в поисках рациональных технологий управления энергоэффективностью.

Основными результатами этих исследований по установлению предельных норм выбросов  $NO_x$  являются [3]:

- требования *IMO* – Технический кодекс по  $NO_x$ , приложение VI «Правила предотвращения загрязнения атмосферы с судов» к Конвенции МАРПОЛ 73/78 (рис. 1, сплошная линия);

- Глава 8А «Выбросы дизельными двигателями выхлопных газов и загрязняющих частиц» Резолюции № 61 Европейской Экономической Комиссии ООН (ЕЭК ООН);

- Глава 8А «Выбросы дизельными двигателями выхлопных газов и загрязняющих частиц» «Рекомендаций, касающихся технических предписаний для судов внутреннего плавания» Дунайской Комиссии;

- Правила Центральной Комиссии Судоходства по Рейну, базирующиеся на Директиве Европейского Союза 97/68/ЕС для двигателей недорожных транспортных средств «*Non-Road Mobile Machinery (NRMM)*», которыми для  $NO_x$  устанавливаются фазы I, II, III (рис. 1).

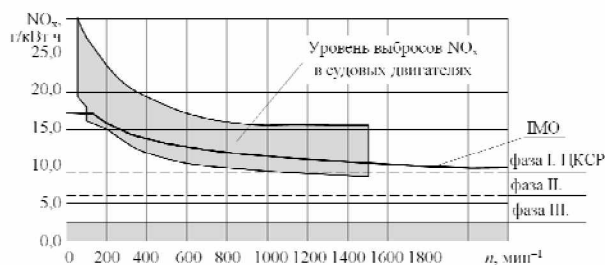


Рис. 1. Уровень выбросов  $NO_x$  в выполненных судовых ДВС в спектре рабочих частот вращения в сравнении с нормативами (данные 2010 г.)

Кроме того, директивой 2004/26/ЕС установлены требования, предъявляемые к процедуре отбора проб газов, к применяемым газоанализаторам, к процедуре измерений, а также определен срок, в течении которого значения вредных выбросов должны поддерживаться ниже предельно допустимого уровня.

В июле 2016 г. объявлено, что Европейский парламент и Совет Европейского союза приняли новое предложение о пересмотре стандартов выбросов ЕС для *NRMM*, этап V. В 2019-2020 годах эти стандарты вступят в силу (табл. 2)

Очевидно, что для международного морского судоходства *IMO* реализован подход к нормированию, планированию и управлению энергоэффективностью путем применения, в то время как во внутреннем судоходстве большее внимание уделяется

количественным ограничениям вредных выбросов на единицу мощности силовой установки. При этом проблема снижения общих выбросов CO<sub>2</sub> обременена дополнительным введением норм выбросов NO<sub>x</sub> и твёрдых частиц PM.

Таблица 2

## Пределные уровни выбросов судовых дизелей, этап V

Номинальная мощность N <sub>н</sub> , кВт	Пределные уровни выбросов судовых дизелей			
	Окись углерода CO <sub>2</sub> , г/кВтч	Углеводороды HC, г/кВтч	Окись азота NO <sub>x</sub> , г/кВтч	Твёрдые частицы PM, г/кВтч
1	2	3	4	5
19 ≤ N <sub>н</sub> < 75	5,0	HC + NO <sub>x</sub> ≤ 4,70	0,30	0,30
75 ≤ N <sub>н</sub> < 130	5,0	HC + NO <sub>x</sub> ≤ 5,40	0,14	0,14
130 ≤ N <sub>н</sub> < 300	3,5	1,00	2,10	0,10
N <sub>н</sub> ≥ 300	3,5	0,19	1,80	0,015

Локальные ограничения и последующие конвенциональные ужесточение норм по вредным выбросам дизелей привело к тому, что все дизелестроительные фирмы, еще в 90-х годах приступили к исследовательским работам по направлениям:

- формирование малотоксичных рабочих процессов: *первичные методы*;
- разработка эффективных систем очистки выпускных газов: *вторичные методы*.

Первичные методы можно разделить на две группы:

- требующие изменения конструкции двигателя и его элементов, которые практически возможны только при разработке новых моделей;
- не требующие существенного изменения конструкции и реализация которых возможна путем модернизации двигателя и его систем.

Наиболее сложной в практической реализации как мировом морском судоходстве, так и для ВВП, оказалась проблема снижения NO<sub>x</sub>.

Исследованиями установлено [3] два принципиальных метода уменьшения выбросов NO<sub>x</sub> в дизелях. Первичный метод преследует цель уменьшения NO<sub>x</sub>, образующегося в процессе собственно сгорания топлива, а вторичный метод преследует цель удаления NO<sub>x</sub> из отработавших газов.

Считается, что оксиды азота могут образовываться только при высокой температуре в камере сгорания, порядка 1800...2800 К, но за фронтом пламени и в зоне продуктов сгорания. Соответственно, все варианты *первичного метода* направлены на уменьшение максимальной температуры цикла, например, за счет раннего закрытия впускных органов (цикл Миллера – *Miller Cycle*), однако это влечет за собой и уменьшение максимального давления сгорания, а значит и уменьшение термического КПД цикла и соответственное увеличение удельного расхода топлива.

Таким образом определяется зона рационального выбора режима работы судовой силовой установки (так называемая дизельная дилемма – «*Diesel Dilemma*», рис.2) [4; 8].

Активный поиск эффективных технологий очистки выпускных газов путем применения фильтров и так называемых катализаторов топлив при понимании значимости мероприятий по снижению расходования топливных ресурсов продолжается. При этом их применение не исключается также и при работе судовой силовой установки на режимах, соответствующих зоне рационального выбора, как она показана на рис. 2.

Примерные соотношения степени снижения выбросов окиси азота NO<sub>x</sub> и соответственного изменения удельного эффективного расхода топлива *b<sub>e</sub>* при некоторых методах, возможных к применению на судах внутреннего плавания, приведены в таблице 3.

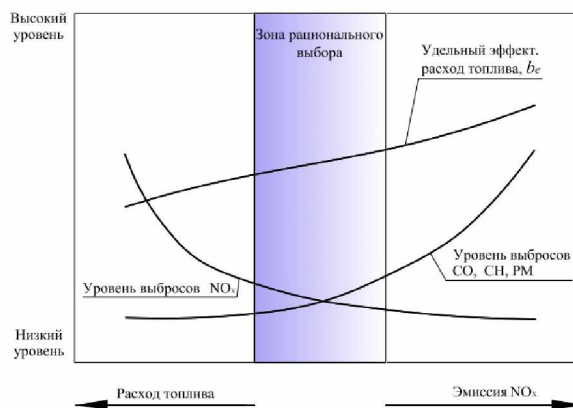


Рис. 2. Диаграмма «Diesel Dilemma»

Таблица 3

Методы снижения уровней выбросов NO<sub>x</sub>

Метод снижения выбросов	Окись азота NO <sub>x</sub> снижение %	Эффективный расход топлива <i>b<sub>e</sub></i> , увеличение %
Водотопливная эмульсия (ВТЭ), 20% H <sub>2</sub> O	15%	1,4%
Водотопливная эмульсия (ВТЭ) и поздний впрыск	30%	2,9%
Прямой впрыск воды (50%)	40%	3,0%
Перепуск газов	12%	2,1%
Селективные катализаторы с сажевым фильтром (SCR + DPF)	98%	7% MDO 14% HFO

Из всех приведенных методов наиболее перспективным с точки зрения снижения NO<sub>x</sub> является применение на выпуске системы на базе селективных катализаторов с сажевым фильтром (SCR catalysts and DPF – diesel particulate filter). При этом качество топлива должно соответствовать требованиям Директивы 2009/30/ЕС с ограничением по со-

держанию серы 10 мг/кг (вступило в силу с 1 января 2011 г.).

Однако, эти системы являются достаточно габаритными для размерений машинных отделений судов внутреннего плавания, требуют особого обслуживания и имеют достаточно высокую стоимость (до 15% стоимости новой СЭУ).

Для судов внутреннего плавания значительное число исследователей рекомендуют применение водотопливной эмульсии (ВТЭ) в том числе для судов в эксплуатации.

Для судов в эксплуатации уменьшение угла опережения подачи топлива приводит к снижению  $NO_x$ , но влечет за собой увеличение удельного расхода топлива в таком соотношении: 10%-ное снижение уровня  $NO_x$  этим методом вызывает 2%-ное увеличение удельного расхода топлива  $b_e$ .

Рациональным вариантом признан способ подачи воды в зону горения топлива, чем обеспечивается испарительное охлаждение наддувочного воздуха и понижение температуры сгорания: оптимальным подбором количества воды, а также угла опережения подачи топлива можно снизить концентрацию  $NO_x$  в 1,5...2 раза по сравнению со схемой обычного впрыска топлива. Изменение параметров наддувочного воздуха, а именно уменьшение температуры и повышение давления наддува на существующих двигателях также приводит к снижению уровня  $NO_x$ , но предписываемых норм величины выбросов как правило не достигают.

**3. Цель и задачи исследования.** Целью работы является исследование соотношения показателей энергоэффективности и количества вредных выбросов в атмосферу во внутреннем судоходстве.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- определение показателя энергоэффективности для судов внутреннего плавания;
- сопоставление количественных показателей вредных выбросов в атмосферу по составляющим;
- определение наиболее рационального способа соотношения показателей энергоэффективности и количества вредных выбросов в атмосферу.

**4. Исследование взаимосвязи показателей энергоэффективности и экологичности во внутреннем судоходстве, а также возможных методов их рационального сочетания.** Если компонентам вредных выбросов условно присвоить численные индексы и ввести для каждого обозначения  $EM_i$ , г/ч, то общая эмиссия  $EM$ , г/ч, определится как

$$EM = \sum_{i=1}^k EM_i, \quad (1)$$

где  $k$  – общее количество компонентов вредных выбросов в атмосферу.

В общем случае массовая доля выброса в атмосферу каждого компонента зависит от ряда  $z$  факторов: химического состава топлива (комплекс факторов 1 –  $F_1$ ), состава силовой установки (комплекс

факторов 2 –  $F_2$ ), характеристик рабочего цикла (комплекс факторов 3 –  $F_3$ ), характеристики расхода топлива (комплекс факторов 4 –  $F_4$ ) и т.д.:

$$EM_i = f(F_1, F_2, F_3, \dots, F_z), \quad (2)$$

при этом для каждого из компонентов вредных выбросов соблюдается зависимость:

$$EM_i = f(n), \quad (3)$$

где  $n$  – частота вращения двигателя.

Для оценки энергоэффективности во внутреннем судоходстве рассмотрим подход, предлагаемый ИМО. Индекс энергоэффективности

$$EEI = \frac{P \cdot SFC \cdot C_F}{Capacity \cdot v}, \quad (4)$$

где  $P$  – 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  $CO_2$ );  $Capacity$  – дедвейт для грузовых судов или валовая вместимость, для пассажирских судов, т;  $v$  – скорость судна, узлы.

В числителе формулы (4) – суммарная эмиссия вредных веществ в атмосферу, приведенная к  $CO_2$ , г/ч, т.е.

$$P \cdot SFC \cdot C_F = EM. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что коэффициент выбросов  $CO_2$  –  $C_F$  – это фактор приведения всех компонентов вредных выбросов в атмосферу к эквиваленту  $CO_2$ , а также то, что определить его можно следующим образом:

$$C_F = \frac{EM}{P \cdot SFC}, \quad (6)$$

т.е. делением суммарной эмиссии всех вредных веществ на произведение мощности и удельного расхода топлива.

При этом, учитывая формы (3), (5), следует

$$EM_i = P \cdot SFC \cdot C_{Fi}; \quad (7)$$

$$C_{Fi} = \frac{EM_i}{P \cdot SFC}, \quad (8)$$

где  $C_{Fi}$  – коэффициент выбросов  $i$ -го компонента, зависящий от марки применяемого топлива

Если принять в качестве мощности эффективную мощность, т.е.  $P = N_e$ , а в качестве удельного расхода топлива  $SFC$  – удельный эффективный расход топлива  $b_e$ , то

$$P \cdot SFC = N_e \cdot b_e = B_{\text{ч}}. \quad (9)$$

Для условий плавания на внутренних водных путях в общем случае часовой расход топлива явля-

ется функцией не только частоты вращения  $n$ , но и скорости течения  $v_t$ ; скорости лобового ветра  $v_{вт}$ ; глубины и ширины фарватера, соответственно  $H$  и  $B$ ; его извилистости (русла рек); локальных ограничений, т.е.

$$B_{ч} = f(n; v_m; v_{эм}; H; B; r). \quad (10)$$

Работа судов во внутреннем судоходстве технологически отличается от морского судоходства в связи с ограничениями по внешним условиям плавания – участки мелководья, «узкие» места, извилистость фарватера, проходящего по руслам рек, разная скорость течения реки на различных участках, пр. Кроме того, например, в дунайском судоходстве большая часть перевозок осуществляется баржебуксирными составами до 9 несамоходных судов, приводимых в движение буксиром-толкачом. Такая технология речных перевозок на большие (до 2000 км) расстояния оправдана экономически и технически. Однако большие составы при движении по речному руслу сталкиваются с необходимостью осуществления проводок, при которых состав расформируется и буксир совершает маневры, поочередно переводя несамоходные единицы флота в узкостях. Кроме того, у каждой несамоходной единицы

может быть свой порт назначения. В связи с этим определение транспортной работы (знаменатель формулы (4)  $A_{тр} = Capacity \cdot v$ , т·км/ч) должно быть адаптировано для грузовых караванов. В качестве  $Capacity$  предлагается, например, принимать суммарную массу перевозимого составом груза.

Вредные выбросы в атмосферу от внутреннего судоходства в эквиваленте  $CO_2$  [6, 11] в сравнении с общим количеством таких выбросов от судоходства в целом и с глобальными выбросами приведены в табл. 4.

Динамика изменения количества вредных выбросов в атмосферу в эквиваленте  $CO_2$  по годам свидетельствует о том, что за период с 2007 по 2015 год меньшие значения соответствуют периодам спада перевозок при общей тенденции к снижению на фоне роста глобальных выбросов.

Если оценивать долю отдельных компонентов (выбросы  $CO$ ,  $HC$ ,  $NO_x$ ,  $PM$ ), то данные [6] свидетельствуют о наличии устойчивой тенденции к снижению количества каждого из них, при этом наихудшие показатели наблюдаются по выбросам  $NO_x$ , затем  $SO_x$  (табл. 5).

Таблица 4

Вредные выбросы в атмосферу в эквиваленте  $CO_2$ , млн. т

Годы	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Внутреннее судоходство	133	139	75	83	110	87	73	78	78
% от глобальных выбросов	0,4%	0,4%	0,2%	0,2%	0,3%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
Судоходство в целом	1100	1135	977	914	1021	942	910	930	932
% от глобальных выбросов	3,5%	3,5%	3,1%	2,7%	2,9%	2,6%	2,5%	2,6%	2,6%
Глобальные выбросы	31959	32133	31822	33661	34726	34968	35672	36084	36062

Таблица 5

Вредные выбросы в атмосферу, млн. т

Годы		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Внутреннее судоходство	$CO$	0,099	0,103	0,060	0,072	0,082	0,076	0,063	0,067	0,068
	% <sup>1</sup>	9,92%	9,91%	6,51%	8,06%	8,41%	8,12%	7,90%	8,28%	8,35%
	НМЛЮС <sup>2</sup>	0,076	0,078	0,038	0,051	0,059	0,053	0,057	0,060	0,062
	%	9,19%	9,09%	5,14%	7,47%	7,96%	7,61%	7,30%	7,63%	7,80%
	$NO_x$	1,564	1,639	0,930	1,114	1,323	1,171	1,030	1,093	1,238
	%	6,86%	6,93%	4,48%	5,94%	6,51%	6,16%	5,59%	5,94%	6,49%
Судоходство в целом	$SO_x$	0,278	0,331	0,202	0,251	0,358	0,268	0,0909	0,0941	0,0954
	%	2,40%	2,78%	1,73%	2,38%	3,15%	2,62%	0,88%	0,91%	0,91%
	$PM$	0,051	0,058	0,033	0,041	0,056	0,044	0,030	0,032	0,031
	%	3,14%	3,45%	2,10%	2,86%	3,58%	3,14%	2,03%	2,13%	2,08%
	$CO$	0,998	1,039	0,921	0,893	0,975	0,936	0,797	0,809	0,814
Судоходство в целом	НМЛЮС	0,827	0,858	0,739	0,683	0,741	0,696	0,781	0,786	0,795
	$NO_x$	22,801	23,639	20,756	18,756	20,310	19,002	18,426	18,398	19,062
	$SO_x$	11,581	11,892	11,646	10,550	11,362	10,240	10,355	10,361	10,457
	$PM$	1,622	1,679	1,574	1,432	1,563	1,402	1,475	1,504	1,492

<sup>1</sup> В таблице 5 указаны % от выбросов соответствующего вещества от судоходства в целом, включая международное морское судоходство, внутреннее и рыболовное

<sup>2</sup> НМЛЮС (NMVOC – англ.) – неметановые летучие органические соединения

**5. Результаты исследований.** Полученные в ходе исследований зависимости (8) при их соотношении с индексом энергоэффективности (его эксплуатационным значением, определенным в соответствии с требованиями ИМО) дадут возможность оценить соотношение экологичности и энергоэффективности во внутреннем судоходстве по каждому из компонентов вредных выбросов с целью последующего анализа достижимости установленных требований, топливной экономичности и применения для существующего возрастного флота. В ходе исследования решены все поставленные задачи:

- определен показатель энергоэффективности для судов внутреннего плавания с учетом особенности технологии их работы и фактически выполняемой транспортной работы;

- определен механизм сопоставления количественных показателей вредных выбросов в атмосферу по составляющим;

- определен наиболее рациональный способ соотношения показателей энергоэффективности и количества вредных выбросов в атмосферу по компонентам.

В то же время, необходимо отметить, что исполнение предписаний по ограничениям выбросов стали основной проблемой для последующей политики использования судов постройки до 2003 г. (свыше 83% действующего флота на ВВП Европы в 2017 г.).

Сложность проблемы заключается в том, что стоимость внедрения дорогостоящих технологий снижения уровней выбросов для судовых энергетических установок с небольшими мощностями или с малым остаточным ресурсом будет составлять значительную долю его общей остаточной стоимости и возможно при этом признать необходимость полной замены СЭУ. Рекомендательные в проекте «*Stage V*» предельные уровни выбросов при применении известных методов (прежде всего *SCR catalysts and DPF – diesel particulate filter*) даже для новых судов возможно будут достигаться, если будут введены специальные методы экономического стимулирования.

В настоящее время коллектив авторов уже располагает экспериментальными данными по проведенным исследованиям на судах частного акционерного общества «Украинское Дунайское пароходство» (материалы готовятся к публикации). Снижение выбросов CO<sub>2</sub> путем уменьшения расхода топлива для судов-толкачей толкаемых составов, возможно в различных пропорциях, при этом основной процент снижения может быть достигнут за счет рационального менеджмента: рациональным планированием рейса и оперативным управлением во время движения (переформирование состава и изменение скоростного режима) в зависимости от текущих навигационных условий.

Основные критерии при оценке эффективности принимаемых решений должны быть следующие:

- затраты на топливо в установленный жизненный цикл;

- принятый предельный уровень выбросов;

- себестоимость модернизации или полной замены СЭУ.

Флот европейских ВВП составил в 2015 г. около 18 тыс. судов, из них «активных» судов с двигателями со средней мощностью от 190 до 3200 кВт – около 11 тыс. единиц.

Самоходные одиночные суда грузового флота составляет около 75% флота, работающего на Рейне и европейских каналах и имеет разные размерения – от средних (менее 55 м по длине) до больших: «европейское судно» ( $L \times B = 110 \text{ м} \times 11,3 \text{ м}$ ), «большое европейское судно» ( $L \times B = 135 \text{ м} \times 11,4 \text{ м}$ ) с относительным средним возрастом до 25 лет и ежегодным пополнением от 60 до 80 новых судов.

В то же время, на Нижнем и Среднем Дунае около 60% процентов перевозок осуществляется большегрузными (до 15 тыс. т) составами, при этом на Дунае 27% транспортного флота – это суда с двигателями (толкачи и буксиры возрастом свыше 35 лет) и 73% – баржевый флот.

Естественно для отдельных ВВП Европы со слабым рынком, включая Дунай, встает вопрос о выборе стратегии использования флота с небольшим остаточным ресурсом при выходе на другие бассейны (на Рейн), а также применения технологий для новых судов, учитывая их значительную стоимость и уменьшения при этом соотношения *cost/ benefit*.

В этом случае возможно обратить внимание (как переходной период) на применение для судов внутреннего плавания биодизеля (*Biodiesel, Biodiesel Blend*), присадок к топливу в качестве донорно-акцепторных веществ для интенсификации его сгорания, а также на возможности специальной обработки топлива перед впрыском.

**6. Выводы.** Введение и последующее ужесточение норм вредных выбросов судовых СЭУ на ВВП Европы ставит дополнительную задачу разработки методики экономико-экологической оценки эффективности производства транспортной продукции (т·км) в сочетании с методами повышения энергоэффективности судоходства.

Учитывая реальные действия по общей интеграции ВВП Европы как транспортных коридоров в единую сеть, следует интенсифицировать исследования по разработке специальных технологий снижения норм вредных выбросов для судов в эксплуатации с учетом их остаточного ресурса жизненного цикла, что позволит обеспечить им продолжение работы на реках с режимами специального контроля.

#### Л и т е р а т у р а

1. Горб, С.И. Мониторинг энергоэффективности судов [Электронный ресурс]. / С.И. Горб // Автоматизация судовых технических средств, 2015, 21: с. 48-53. - Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN /asts\\_2015\\_21\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN /asts_2015_21_11)
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, 2018. – Вып. 24. – С. 94 – 102. – ISSN 1819-3293.

3. Суворов, П.С. Судовые двигатели внутреннего сгорания [Текст] / П.С.Суворов. – Одесса: ОНМА, 2011. – 608 с. – ISBN 966-7591-14-1.
4. Abschlussbericht des BMVBS F&E-Vorhabens: "Erprobung von Partikelfiltern für den Einsatz in der Binnenschifffahrt" [Электронный ресурс]. – GL, 2006. – 121 p. – Режим доступа 07.10.18: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Wasser/projektbericht\\_partikelfilter.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Wasser/projektbericht_partikelfilter.pdf?__blob=publicationFile)
5. Bond, T. C. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. [Электронный ресурс] / T.C. Bond, S. J. Doherty, D. W. Fahey, P. M. Forster, T. Berntsen, B. J. DeAngelo, M. G. Flanner, S. Ghan, B. Kärcher, D. Koch, S. Kinne, Y. Kondo, P. K. Quinn, M. C. Sarofim, M. G. Schultz, M. Schulz, C. Venkataraman, H. Zhang, S. Zhang, N. Bellouin, S. K. Guttikunda, P. K. Hopke, M. Z. Jacobson, J. W. Kaiser, Z. Klimont, U. Lohmann, J. P. Schwarz, D. Shindell, T. Storelvmo, S. G. Warren, and C. S. Zender. // JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: ATMOSPHERES, VOL. 118, doi:10.1002/jgrd.50171, 2013. – p. 5380–5552 – Режим доступа 07.10.18: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/jgrd.50171>
6. Bond, T. C. Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013–2015 [Электронный ресурс] / Naya Olmer, Bryan Comer, Biswajoy Roy, Xiaoli Mao, And Dan Rutherford. – International Council on Clean Transportation, 2017. – 38 p. – Режим доступа 07.10.18: [https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015\\_ICCT-Report\\_17102017\\_vF.pdf](https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015_ICCT-Report_17102017_vF.pdf)
7. Environmentally friendly inland waterway ship design for the Danube River [Электронный ресурс] / World Wide Fund For Nature International. Danube-Carpathian Programme (WWF-DCP); рук. Dejan Radojčić. – Project №: 9E0726.04. – Republic of Serbia, 2009. – 121 с. – Библиогр. с. 95-98. – Режим доступа 07.10.18: [http://assets.panda.org/downloads/iww\\_danube\\_ship\\_design\\_final\\_december\\_2009.pdf](http://assets.panda.org/downloads/iww_danube_ship_design_final_december_2009.pdf)
8. Jose, E. Exhaust Gas Recirculation in CI Engines [Электронный ресурс]. / Edwin Jose, Muhammed Muhais A., V. Ravikumar // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). Vol. 3 Issue III doi:10.22214/ijraset, 2015. – p. 763-767. – Режим доступа 07.10.18: <https://www.ijraset.com/files/serve.php?FID=1930>
9. Möglichkeiten zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Treibhausgasemissionen in der Binnenschifffahrt [Электронный ресурс]. – Zentralkommission für die Rheinschifffahrt, 2012. – 99 p. – Режим доступа 07.10.18: [https://www.ccr-zkr.org/files/documents/rapports/Thg\\_ber\\_de.pdf](https://www.ccr-zkr.org/files/documents/rapports/Thg_ber_de.pdf)
10. Second IMO GHG Study 2009 [Электронный ресурс]. – IMO, 2009. – 240 p. – Режим доступа 07.10.18: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/SecondIMOGHGStudy2009.pdf>
11. Third IMO GHG Study 2014 [Электронный ресурс]. – IMO, 2014. – 331 p. – Режим доступа 07.10.18: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>

## References

1. Horb, S.Y., (2015). Monitorynh enerhoeffektyvnosty sudov. Avtomatyzatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv, 21, 48-53. Access mode: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/asts\\_2015\\_21\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/asts_2015_21_11)
2. Suvorov, P.S., Tarasenko, T.V., Zalozh, V.I., (2018). Otsenka osnovnykh faktorov, opredeliaushchykh enerhoeffektyvnost sudov vnutrenneho plavaniya. Avtomatyzatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv, 24, 94-102.
3. Suvorov, P.S., (2011). Sudovye dvyhately vnutrenneho shoranyia. Odessa: ONMA, 608. ISBN 966-7591-14-1.
4. (2006). Abschlussbericht des BMVBS F&E-Vorhabens: "Erprobung von Partikelfiltern für den Einsatz in der Binnenschifffahrt" . – GL, 121 p. Access mode: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Wasser/projektbericht\\_partikelfilter.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Wasser/projektbericht_partikelfilter.pdf?__blob=publicationFile)
5. Bond, T. C., Doherty S. J., Fahey D. W., Forster P. M., Berntsen T., DeAngelo B. J., Flanner M. G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P. K., Sarofim M. C., Schultz M. G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S. K., Hopke P. K., Jacobson M. Z., Kaiser J. W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J. P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S. G., Zender C. S., (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: ATMOSPHERES, 118, 5380–5552, doi:10.1002/jgrd.50171. Access mode: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/jgrd.50171>
6. Bond, T. C., Naya Olmer, Bryan Comer, Biswajoy Roy, Xiaoli Mao, And Dan Rutherford (2017). Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013–2015. International Council on Clean Transportation, 38. Access mode: [https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015\\_ICCT-Report\\_17102017\\_vF.pdf](https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015_ICCT-Report_17102017_vF.pdf)
7. Dejan Radojčić, (2009). Environmentally friendly inland waterway ship design for the Danube River. World Wide Fund For Nature International. Danube-Carpathian Programme (WWF-DCP), Project №: 9E0726.04, Republic of Serbia, 121. Access mode: [http://assets.panda.org/downloads/iww\\_danube\\_ship\\_design\\_final\\_december\\_2009.pdf](http://assets.panda.org/downloads/iww_danube_ship_design_final_december_2009.pdf)
8. Jose, E., Edwin Jose, Muhammed Muhais A., Ravikumar V., (2015). Exhaust Gas Recirculation in CI Engines. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), 3/III, 763-767. doi:10.22214/ijraset. Access mode: <https://www.ijraset.com/files/serve.php?FID=1930>
9. (2012). Möglichkeiten zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Treibhausgasemissionen in der Binnenschifffahrt. Zentralkommission für die Rheinschifffahrt, 99. Access mode: [https://www.ccr-zkr.org/files/documents/rapports/Thg\\_ber\\_de.pdf](https://www.ccr-zkr.org/files/documents/rapports/Thg_ber_de.pdf)
10. (2009). Second IMO GHG Study 2009. IMO, 240. Access mode: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/SecondIMOGHGStudy2009.pdf>
11. (2014). Third IMO GHG Study 2014. IMO, 331. Access mode: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>

**Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Залож В.І., Максимов С.Б. Про співвідношення енергоефективності та екологічності у внутрішньому судноплаванні**

У проведеному дослідженні розглянуті питання нормування шкідливих викидів до атмосфери у судноплаванні на європейських внутрішніх водних шляхах. Показані відмінності технологій перевезень в міжнародному морському, європейському внутрішньому і дунайському судноплаванні. Виконано аналіз показників енергоефективності, встановлених в міжнародному морському судноплаванні, а також особливості їх застосування у внутрішньому судноплаванні. Визначено принципи застосування показників енергоефективності до оцінки екологічних показників роботи суден у внутрішньому судноплаванні з урахуванням специфіки навігаційних умов та інших факторів, що визначають режими роботи суднового пропульсивного комплексу.

Таким підходом, зокрема пропонується вирішити практичну задачу, сформульовану встановленням нормативних обмежень по компонентам шкідливих викидів, які ставлять в однакові умови судновласників різних за характеристиками і технологіям роботи суден, які працюють в різних навігаційних умовах.

Сучасний стан дунайського судноплавання відрізняється недостатньою забезпеченістю навігаційних умов, віковим складом флоту, а також специфікою самого флоту - його здатністю працювати протягом усього Дунаю (більше 2000 км) при завантаженні важкими караванами з суден несамохідного флоту. Така специфіка значно відрізняє дунайське судноплавання від судноплавання по іншим внутрішніми водними шляхами Європи, на яких цілий рік забезпечені прохідні глибини, дальність переходів в десятки разів менше, а роботу здійснюють здебільшого самохідні суховантажні і наливні судна.

Відповідно, є підстави стверджувати, що судовласники існуючого дунайського тягового і самохідного флоту без суттєвої його модернізації та оновлення зможуть виключно управляти показниками енергоефективності, показано співвідношення характеристик енергоефективності та екологічності та визначено умови, в яких можливе досягнення підвищення енергоефективності при одночасному зниженні кількості шкідливих викидів в атмосферу.

**Ключові слова:** шкідливі викиди, енергоефективність, екологічні показники, судноплавання, склад суден, несамохідне судно, штовхач

**Suvorov P., Tarasenko T., Zalozh V., Maksymov S. About ratio of energy efficiency and ecological compatibility for inland navigation vessels**

Present state of the Danube shipping is differed by insufficient provision of navigation conditions, age composition of the fleet, as well as the fleet specifics – its ability to work throughout the Danube (over 2000 km) when loaded with heavy caravans from non-self-propelled vessels. This specificity significantly differentiates the Danube navigation from navigation on other inland waterways in Europe, which provided

year-round through depths, range of transitions to ten times less, and the work carried out for the most part self-propelled dry cargo and tanker vessels.

The study deals with the build a common model for managing energy efficiency and environmental performance of a self-propelled river towing and traction fleet. The differences in transportation technologies in international maritime, European inland and Danube shipping are shown. The issues of rationing of harmful emissions into the atmosphere in shipping on European inland waterways are considered. The analysis of energy efficiency indicators established in international maritime shipping, as well as the peculiarities of their use in inland navigation, was carried out. The principles of the application of energy efficiency indicators to the assessment of environmental indicators of ships in inland navigation have been determined, taking into account the specifics of navigation conditions and other factors determining the operating modes of the ship propulsion complex.

Innovative approach in the study lies in the fact that in the known studies carried out earlier, were considered the Danube fleet operating on the upper sections of the Danube. According to this, the practical solution to the problem of determining the potential to reduce harmful emissions for the existing fleet as well as the formation of the concept of energy efficiency management in the shipping industry is unresolved.

Consequently, the ways of achieving energy efficiency while reducing the amount of harmful emissions into the atmosphere were identified. A possibility of controlling characteristics of energy efficiency of existing Danube traction and self-propelled fleet without significant modernization and upgrades is presented

**Keywords:** emissions, energy efficiency, environmental performance, shipping, ships, composition of ships, dumb vessel, pusher.

**Суворов Петро Семенович** – Академік ТAU, доктор технічних наук, професор, Кафедра суднових енергетичних установок і систем, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», E-mail: petr.s.suvorov@gmail.com

**Тарасенко Тетяна Владиславівна** – кандидат технічних наук, кафедра інженерних дисциплін, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», вул. Фанагорійська 9, м. Ізмаїл, Україна, 68607 E-mail: sergeysunnysat@gmail.com

**Залож Віталій Іванович** – здобувач, кафедра інженерних дисциплін, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія» E-mail: zalozh@ukr.net

**Максимов Сергій Борисович** – здобувач, кафедра інженерних дисциплін, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія» E-mail: maksimov15477@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Соколов В.І.**

Стаття подана 03.03. 2019