

18. Akhnazarova S L, Kafarov V V 1985 Experiment optimization methods in chemical technology (Moscow: Mir) 327.
19. Sovremennye trebovaniya v oblasti zagryazneniya vozduшной среды оксидами серы s судов / M. A. Modina, E. V. Hekert, A. I. Epihin [i dr.] // Ekspluatsiya morskogo transporta. – 2021. – № 3(100). – S. 88-91.
20. Sostoyanie problemy i metody snizheniya vrednykh vybrosov sudovykh energeticheskikh ustanovok / T. A. Makarevich, E. V. Hekert, YU. S. Kuznecova [i dr.] // Ekspluatsiya morskogo transporta. – 2022. – № 2(103). – S. 127-134.
21. Sovremennye trebovaniya v oblasti zagryazneniya vozduшной среды оксидами серы s судов / M. A. Modina, E. V. Hekert, A. I. Epihin [i dr.] // Ekspluatsiya morskogo transporta. – 2021. – № 3(100). – S. 88-91.
22. Kondratyev, S. I. Using telematics data to support effective solutions for tracking and monitoring the power system condition of unmanned vessels / S. I. Kondratyev, A. I. Epikhin // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, 15–16 iyunya 2021 goda. – Novorossiysk, Virtual, 2021. –

УДК 504.3.054: 621.43.068.4

DOI: 10.34046/aumsuomt104/14

АДСОРБЦИОННЫЙ МЕТОД СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА СУДОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Г.В. Игнатенко, старший преподаватель

O.V. Sviderskaya, PhD in mechanical engineering (Belarus)

В.А. Туркин, доктор технических наук, профессор

Рассмотрен способ очистки отработавших газов судового дизельного двигателя от диоксида углерода путем адсорбции, протекающей параллельно с конденсацией водяных паров, образующихся в процессе горения топлива в цилиндре дизеля. Предложена конструкция устройства повышенной эффективности для очистки отработавших газов судового двигателя, принципом работы которого является использование гранулированной шлаковой пемзы в качестве адсорбента для вредных компонентов отработавших газов и озона в качестве окислителя для ускорения процесса очистки. Проведен натурный эксперимент с целью проверки работоспособности устройства и оценки его эффективности при очистке реальных отработавших газов двигателя. Получена математическая модель для оценки влияния объемного расхода отработавших газов двигателя и концентрации озона на входе в установку на эффективность очистки, получаемой в результате использования предложенной установки для адсорбционной очистки отработавших газов от диоксида углерода.

Ключевые слова: судовой двигатель, отработавшие газы, диоксид углерода, извлечение, адсорбция, математическая модель

ADSORPTION METHOD FOR REDUCING CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM MARINE ENGINES

G.V. Ignatenko, O.V. Sviderskaya V.A. Turkin

A method for cleaning the exhaust gases of a marine diesel engine from carbon dioxide by adsorption, which occurs in parallel with the condensation of water vapor formed during the combustion of fuel in a diesel cylinder, is considered. A design of a device of increased efficiency for the purification of exhaust gases of a marine engine is proposed, the principle of which is the use of granulated slag pumice as an adsorbent for harmful components of exhaust gases and ozone as an oxidizing agent to speed up the purification process. A full-scale experiment was carried out in order to test the operability of the device and evaluate its effectiveness in cleaning real engine exhaust gases. A mathematical model has been obtained to assess the effect of the volumetric flow rate of the exhaust gases of the engine and the concentration of ozone at the inlet to the installation on the purification efficiency obtained as a result of using the proposed installation for the adsorption purification of exhaust gases from carbon dioxide.

Keywords: marine engine, exhaust gases, carbon dioxide, extraction, adsorption, mathematical model

Введение

Вступление в силу в 2005 году Приложения 6 «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» к Конвенции МАРПОЛ 73/78 положили начало планомерной работе Международной морской организации (ИМО) по оздоровлению воздушной среды [1]. Повышение качества окружающей среды является важнейшей

составляющей деятельности человека, направленной на использование природных ресурсов [2, 3]. Морской транспорт несет ответственность за примерно 2,5% мировых выбросов парниковых газов и около 940 миллионов тонн диоксида углерода CO₂ ежегодно [4]. Чтобы снизить выбросы ИМО объявила о Стратегии сокращения выбросов парниковых газов с судов. Цель Стратегии состоит в

том, чтобы сократить выбросы CO₂ в среднем по международным морским перевозкам как минимум на 40% к 2030 году, стремясь достичь 70% к 2050 году по сравнению с 2008 годом. Стратегией был введен конструктивный коэффициент энергетической эффективности (ККЭЭ) – (Energy Efficiency Design Index – EEDI) как показатель углеродоемкости судна [1, 5]. EEDI – это индекс, который указывает на энергоэффективность судна и измеряется в граммах CO₂ (генерируемых) на тонно-милю (перевезенный груз), рассчитанная для конкретных исходных условий эксплуатации судна. Снижение индекса EEDI разделено на три этапа: 2015-2019, 2020-2024, 2025 годы и далее. Величина снижения EEDI по сравнению с его исходным значением для указанных этапов составляет соответственно 10%, 20% и 30% [6].

Судоходной отрасли доступны различные решения для повышения энергоэффективности новых судов (другими словами, для снижения индекса EEDI). Самый простой способ уменьшить выбросы, не требующий доработок или вложений, – это снижение скорости. В работе [7] отмечается, что в определенных условиях снижение скорости доставки дает выигрыш в экономии средств, что побуждает применять такие меры.

С 2008 года большинство компаний и судовладельцев применяют снижение скорости с целью сокращения выбросов углерода и повышения эффективности судов, что привело к значительному снижению выбросов CO₂ водным транспортом [8].

В данной статье дается оценка возможности снижения EEDI за счет размещения на судне установки для извлечения из отработавших газов диоксида углерода методом адсорбции. Метод извлечения CO₂ успешно применяется в наземных отраслях промышленности, характеризующихся высокими выбросами CO₂, таких как электростанции, работающие на ископаемом топливе [9]. Преимуществом метода являются отсутствие необходимости изменять компоновку машинного отделения, поскольку установка очистки газов размещается после энергетического оборудования.

Постановка задачи

В предыдущей публикации [10] был рассмотрен метод очистки отработавших газов судовых двигателей от диоксида углерода путем использования механизма его адсорбции твердым веществом в показанном на рисунке 1 комплексном устройстве очистки отработавших газов судового дизельного двигателя.

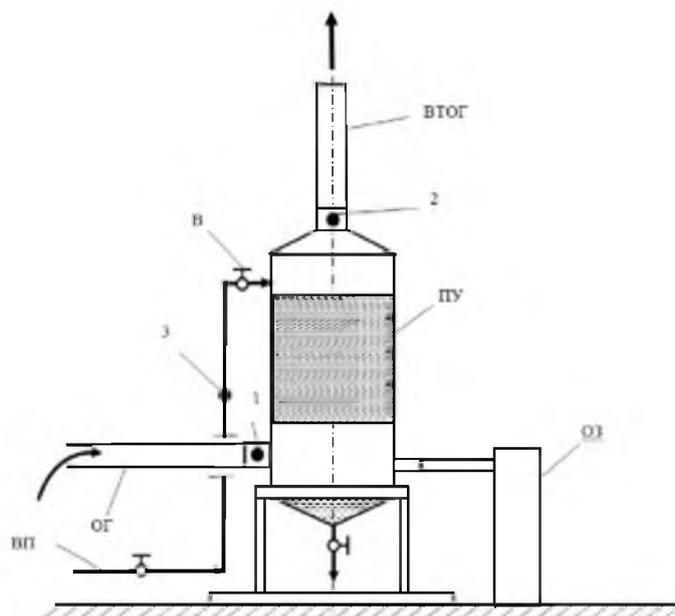


Рисунок 1 – Принципиальная технологическая схема установки для проведения эксперимента по очистке отработавших газов: ПУ – пилотная установка; ОЗ – озонатор; ОГ – отводной газоход; ВП – водопровод; В – вентиль; ВТОГ – выхлопная труба очищенных газов; 1, 2, 3 – аналитические точки

В основе работы предлагаемого устройства лежит использование гранулированной шлаковой пемзы в качестве адсорбента вредных компонентов отработавших газов и озона в качестве окислителя для ускорения процесса очистки. Ввиду

высокой реакционной способности озона происходит окисление значительной части монооксидов азота NO, содержащихся в выхлопных газах, до диоксидов NO₂; диоксидов серы SO₂ – до серного ангидрида SO₃; монооксида углерода CO – до

диоксида углерода CO_2 . Поток отработавших газов, многократно попадая на поверхность и внутрь гранул, очищается от вредных примесей NO_x , SO_x , CO_x , которые оседают на поверхности и внутри гранул. Кроме того, на поверхности и в порах гранул оседают мелкодисперсные частицы (сажа и зола), после чего очищенные отработавшие газы выбрасываются в атмосферу [10, 14].

Для исследования возможности практического внедрения предлагаемого способа очистки отработавших газов от CO_2 была изготовлена пилотная установка, представляющая собой показанное на рисунке 1 односекционное комплексное устройство [10].

Внутри корпуса устройства расположены поддон и камера с секцией очистки. В камере установлены вертикальные зигзагообразные контейнеры с перфорированными боковыми стенками и днищем, образующие между собой зигзагообразные каналы. При этом зигзагообразные контейнеры заполнены гранулами пемзы.

На первом этапе проверки эффективности работы установки в качестве источника продуктов сгорания был выбран двигатель внутреннего сгорания мощностью 105 кВт. Работа двигателя контролировалась по следующим параметрам: частота вращения коленчатого вала, расход топлива, массовый расход воздуха, параметры потока отработавших газов.

В результате проведенных экспериментов и обработки данных измерений было установлено [10], что минимальное значение степени очистки отработавших газов от диоксида углерода, равное 28,9 % будет иметь место при частоте вращения коленчатого вала исследуемого двигателя 2000 мин^{-1} ; максимальное значение степени очистки отработавших газов от диоксида углерода, равное 31,8 % будет иметь место при частоте вращения коленчатого вала исследуемого двигателя 4000 мин^{-1} . Аппроксимационная зависимость для расчёта степени очистки y , %, в экспериментальной установке от диоксида углерода, содержащегося в отработавших газах исследуемого двигателя, в зависимости от частоты вращения его коленчатого вала x , мин^{-1} , будет иметь следующий вид:

$$y = 6.0 \cdot 10^{-10}x^3 - 6.0 \cdot 10^{-6}x^2 + 0.0236x + 2.9214.$$

Также было отмечено, что эффективность извлечения CO_2 из отработавших газов зависит от их объемного расхода и концентрации озона на входе в установку. С целью получения зависимости эффективности очистки от указанных выше

параметров был проведен второй этап исследований на данной установке. Результаты проведенного эксперимента приведены ниже.

Математическая модель зависимости степени очистки от расхода отработавших газов и концентрации озона

С целью получения математической модели, описывающей влияние объемного расхода отработавших газов исследуемого двигателя и концентрации озона на входе в установку на степени очистки отработавших газов методом адсорбции от диоксида углерода, эксперименты проводились по специально разработанному плану с учетом рекомендаций теории планирования эксперимента [11, 12, 13].

Математическая модель в общем случае будет иметь следующий вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

где y – значение степени очистки отработавших газов методом адсорбции от диоксида углерода в экспериментальной установке, %;

x_i, x_j – значения факторов в кодированном масштабе;

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – значения коэффициентов математической модели.

Для нахождения неизвестных значений коэффициентов b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} математической модели (1) был реализован полный факторный эксперимент вида 3^2 , то есть необходимо было провести 9 опытов для двух независимых факторов z_1 и z_2 при трех значениях каждого фактора (в безразмерной системе координат это: + 1 – максимальное значение фактора; 0 – среднее значение фактора; - 1 – минимальное значение фактора). Факторами были: z_1 – объемный расход отработавших газов исследуемого двигателя, $\text{м}^3 \cdot \text{час}^{-1}$; z_2 – концентрация озона на входе в экспериментальную установку, $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$.

Матрица планирования полного факторного эксперимента вида 3^2 , значения факторов в натуральном масштабе и в безразмерной системе координат, а также результаты девяти проведенных опытов и рассчитанные значения исследуемой величины (значение степени очистки отработавших газов методом адсорбции от диоксида углерода в исследуемой экспериментальной установке, %) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица планирования и реализация полного факторного эксперимента

№ опыта	Факторы в натуральном масштабе		Факторы в безразмерной системе координат				Исследуемая величина	
	$z_1, \text{м}^3 \cdot \text{час}^{-1}$	$z_2, \text{г} \cdot \text{м}^{-3}$	x_1	x_2	$x_1^2 - \frac{2}{3}$	$x_2^2 - \frac{2}{3}$	из эксперимента	из математической модели
							$y, \%$	$\hat{y}, \%$
1	20	10	-1	-1	1/3	1/3	28,1	28,10
2	20	15	-1	0	1/3	-2/3	28,9	28,67
3	20	20	-1	+1	1/3	1/3	29,3	29,25
4	40	10	0	-1	-2/3	1/3	31,0	30,22
5	40	15	0	0	-2/3	-2/3	31,4	30,57
6	40	20	0	+1	-2/3	1/3	31,6	30,92
7	60	10	+1	-1	1/3	1/3	31,3	31,30
8	60	15	+1	0	1/3	-2/3	31,4	31,43
9	60	20	+1	+1	1/3	1/3	31,5	31,55

Для упрощения расчетов значений коэффициентов математической модели (1) матрица эксперимента с использованием зависимости (2) была приведена к ортогональному плану:

$$x'_j = x_j^2 - \bar{x}_j^2 = x_j^2 - \sum_{i=1}^N x_{ji}^2 / N = x_j^2 - 6/9 = x_j^2 - 2/3, \tag{2}$$

где $N = 9$ – количество опытов в эксперименте.

В этом случае все коэффициенты математической модели (1) определяются с использованием следующего выражения:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}. \tag{3}$$

Например, значение коэффициента b_1 при независимом факторе x_1 находится следующим образом:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^9 x_{1i} y_i}{\sum_{i=1}^9 x_{1i}^2} = 9,0 / 6 = 1,5.$$

Подобным образом с использованием зависимости (3) были рассчитаны значения остальных коэффициентов математической модели (1). Они оказались равными:

$$b'_0 = 30,622; b_2 = 0,335; b_{12} = -0,225; b_{11} = -0,237; b_{22} = -0,026.$$

В результате расчетов по матрице с преобразованными столбцами для квадратичных эффектов получается следующая математическая модель:

$$\hat{y} = b'_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} (x_1^2 - \bar{x}_1^2) + b_{22} (x_2^2 - \bar{x}_2^2). \tag{4}$$

Для перехода к обычной записи b_0 определяется по формуле:

$$b_0 = b'_0 - b_{11} \bar{x}_1^2 - b_{22} \bar{x}_2^2 = 30,622 + 0,237(6/9) + 0,026(6/9) = 30,797. \tag{5}$$

Тогда математическая модель (1) в безразмерной системе координат будет иметь следующий вид:

$$\hat{y} = 30,797 + 1,5x_1 + 0,35x_2 - 0,225x_1 x_2 - 0,237x_1^2 - 0,026x_2^2. \tag{6}$$

В системе координат с факторами в натуральном масштабе будем иметь следующий вид искомой математической модель:

$$\hat{y} = 30,797 + 0,075(z_1 - 40) + 0,07(z_2 - 15) - 0,00225(z_1 - 40)(z_2 - 15) - 0,0015(z_1 - 40)^2 - 0,00104(z_2 - 15)^2. \tag{7}$$

где y – значение степени очистки отработавших газов методом адсорбции от диоксида углерода в экспериментальной установке, %; z_1 – объемный расход отработавших газов исследуемого двигателя, $\text{м}^3 \cdot \text{час}^{-1}$; z_2 – концентрация озона на входе в экспериментальную установку, $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$.

С целью определения дисперсии воспроизводимости $s_{\text{воспр}}^2$, знание которой необходимо для проверки адекватности полученного уравнения результатам проведенного эксперимента по критерию Фишера, в центре плана были поставлено дополнительно три параллельных опыта и получены следующие значения исследуемой величины y :

$$y_1^0 = 31,3; y_2^0 = 31,7; y_3^0 = 31,5; \bar{y}^0 = \sum_{u=1}^3 y_u^0 / 3 = 31,5;$$

$$s_{\text{воспр}}^2 = \sum_{u=1}^3 (y_u^0 - \bar{y}^0)^2 / 2 = 0,04; s_{\text{воспр}} = 0,2.$$

Адекватность полученной математической модели (6) результатам проведенных экспериментов проверяется по критерию Фишера с использованием следующей зависимости:

$$F = s_{\text{ост}}^2 / s_{\text{воспр}}^2, \text{ здесь } s_{\text{ост}}^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / (N - l) = 1,68 / 3 = 0,56.$$

где l – число значимых коэффициентов в математической модели (1), равное 6;

\hat{y} – значение исследуемой величины, рассчитанное с использованием полученной математической модели, %.

Тогда критерий Фишера будет равен: $F = 0,56 / 0,04 = 14,0$.

Табличное значение критерия Фишера для уровня значимости $p = 0,05$, и степеней свободы соответственно $f_1 = 3$, $f_2 = 2$, $F_{1-p}(f_1, f_2) = 19,2$.

Так как значение критерия Фишера для полученной математической модели оказалось меньше его табличного значения, то есть $F = 14,0 < F_{1-p}(f_1, f_2) = 19,2$, то отсюда следует, что математическая модель (6) будет адекватно описывать результаты проведенного эксперимента.

Следовательно, полученная математическая модель может быть использована для оценки влияния объемного расхода отработавших газов двигателя внутреннего сгорания и концентрации озона на входе в экспериментальную установку на эффективность очистки, получаемую в результате использования предложенной установки адсорбционной очистки отработавших газов двигателя от диоксида углерода.

На рисунке 2 представлен графический вид зависимости (7).

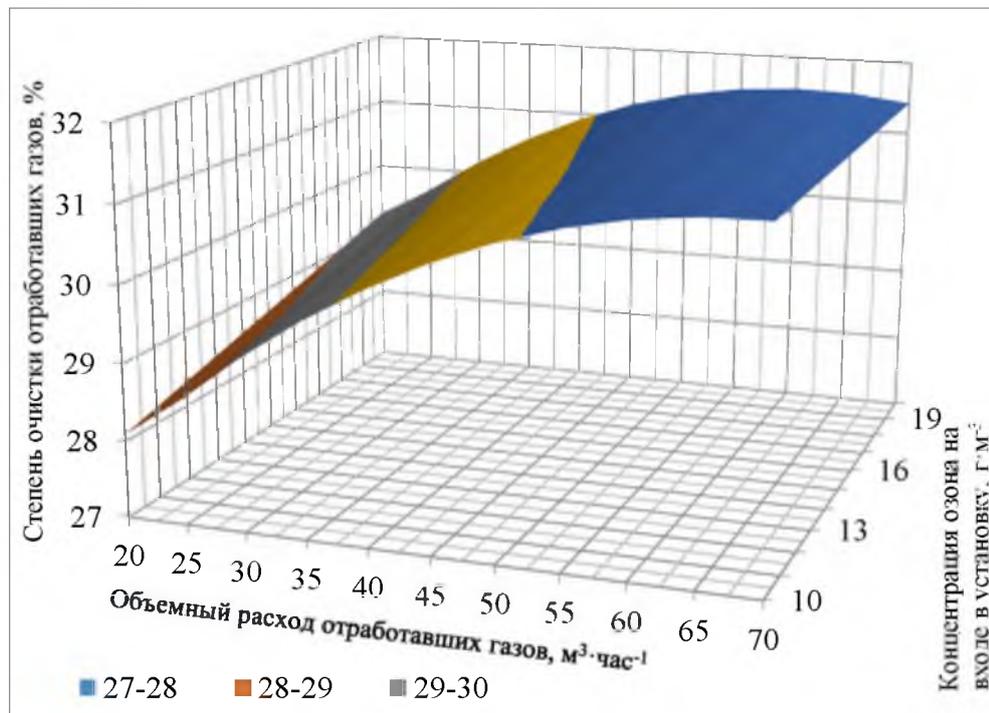


Рисунок 2 – Зависимость степени очистки отработавших газов от диоксида углерода от объемного расхода отработавших газов и концентрации озона на входе в установку

Анализ графической зависимости, представленной на рисунке 2 показывает, что максимальное значение степени очистки отработавших газов от диоксида углерода, равное 31,55 %, достигается при объемном расходе отработавших

газов исследуемого двигателя, равном 60 м³·час⁻¹, и концентрации озона на входе в экспериментальную установку, равной 20 г·м⁻³. При дальнейшем росте значения объемного расхода отра-

ботавших газов до $70 \text{ м}^3 \cdot \text{час}^{-1}$, происходит незначительное снижение степени очистки отработавших газов от диоксида углерода до значения 31,43 %. Это может быть следствием роста скорости отработавших газов и соответственно снижения времени их нахождения в экспериментальной установке.

Заключение

С целью получения математической модели, описывающей влияние объемного расхода отработавших газов двигателя внутреннего сгорания x_1 и концентрации озона на входе в установку x_2 на эффективность очистки y , эксперименты проводились по специально разработанному плану с учетом рекомендаций теории планирования эксперимента. Разработана матрица планирования полного факторного эксперимента вида 3^2 , включающая значения независимых факторов x_1 и x_2 в натуральном масштабе и в безразмерной системе координат, а также результаты восьми проведенных опытов y и рассчитанные значения исследуемой величины \hat{y} (значение степени очистки отработавших газов методом адсорбции от CO_2 в исследуемой экспериментальной установке, %). Получен следующий вид разработанной математической модели:

$$\hat{y} = 30,797 + 1,5x_1 + 0,35x_2 - 0,225x_1x_2 - 0,237x_1^2 - 0,026x_2^2.$$

Проверки адекватности полученной математической модели результатам проведенного эксперимента по критерию Фишера показала, что, так как значение критерия Фишера для полученной математической модели оказалось меньше его табличного значения, то есть $F = 14,0 < F_{1-p}(f_1, f_2) = 19,2$, то данная математическая модель будет адекватно описывать результаты проведенного эксперимента. Следовательно, математическая модель может быть использована для оценки влияния объемного расхода отработавших газов двигателя внутреннего сгорания и концентрации озона на входе в установку на эффективность очистки, получаемой в результате использования предложенной установки для адсорбционной очистки отработавших газов от диоксида углерода.

Литература

1. Иванченко А.А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов /А.А. Иванченко, А.П. Петров, Г.Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.– 2015.- № 3 (31).– С. 103-112.

2. Modina M A, Khekert E V, Voskanyan A A, Pismenskaia Yu V, Epikhin A I, Shkoda V V 2021 Bioindication and biomonitoring assessment of the state of atmospheric air and soil in the study area IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 867 012072.
3. Modina M A, Khekert E V, Epikhin A I, Voskanyan A A, Shkoda V V, Pismenskaya Yu V 2021 Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 867 012104.
4. Stec M, Tatarczuk A, Iluk T, Szul M 2021 Reducing the energy efficiency design index for ships through a post-combustion carbon capture process International Journal of Greenhouse Gas Control 108 103333.
5. Епихин А.П. Концепция экологического совершенствования судовых энергетических установок / А.И. Епихин, М.А. Модина, Е.В. Хекерт // Эксплуатация морского транспорта.– 2020.– № 3 (96).– С. 127-132..
6. Resolution MEPC.203(62) 2011 Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, As Modified by the Protocol of 1978 Relating Thereto.
7. Chang C C, Wang C M 2014 Evaluating the effects of speed reduce for shipping costs and CO2 emission Transportation Research Hfirt D: Transport Environmnt 31 pp 110-115.
8. Cariou P 2011 Is slow steaming a sustainable means of reducing CO2 emissions from container shipping? Transportation Research Hfirt D: Transport Environmnt 16 pp 260-264.
9. WWW Document 2017 Petra Nova Is One of Two Carbon Capture and Sequestration Power Plants in the World – Today in Energy – U.S. Energy Information Administration (EIA). URL <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=33552> (Дата обращения 28.06.2021).
10. Turkin V A, Pismenskaya Yu V, Ignatenko G V 2021 Carbon dioxide extraction from marine engine exhaust gases by the method of adsorption IOP Conference Series Earth and Environmental Science 872 012007.
11. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк, 1985. – 327 с.
12. Современные требования в области загрязнения воздушной среды оксидами серы с судов / М. А. Модина, Е. В. Хекерт, А. И. Епихин [и др.] // Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – № 3(100). – С. 88-91.
13. Kondratyev, S. I. Using telematics data to support effective solutions for tracking and monitoring the power system condition of unmanned vessels / S. I. Kondratyev, A. I. Epikhin // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, 15–16

- июня 2021 года. – Novorossiysk, Virtual, 2021. – P. 012089. – DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012089. – EDN QOSRJQ.
14. Kondratyev, S. I. Using telematics data to support effective solutions for tracking and monitoring the power system condition of unmanned vessels / S. I. Kondratyev, A. I. Epikhin // *Journal of Physics: Conference Series*, Novorossiysk, Virtual, 15–16 июня 2021 года. – Novorossiysk, Virtual, 2021.
- References**
- Ivanchenko A A, Petrov A P, Zhivlyuk G P 2015 Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions *Bulletin of the State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S.O. Makarova* 3 pp 103-112.
 - Modina M A, Khekert E V, Voskanyan A A, Pismenskaia Yu V, Epikhin A I, Shkoda V V 2021 Bioindication and biomonitoring assessment of the state of atmospheric air and soil in the study area *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 867 012072.
 - Modina M A, Khekert E V, Epikhin A I, Voskanyan A A, Shkoda V V, Pismenskaya Yu V 2021 Ways to reduce harmful emissions from the operation of power plants in special environmental control areas *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 867 012104.
 - Stec M, Tatarczuk A, Iluk T, Szul M 2021 Reducing the energy efficiency design index for ships through a post-combustion carbon capture process *International Journal of Greenhouse Gas Control* 108 103333.
 - Epikhin A I, Modina M A, Khekert E V 2020 Concept of environmental improvement of ship power plants *Operation of sea transport* 3 pp 127-132.
 - Resolution MEPC.203(62) 2011 Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, As Modified by the Protocol of 1978 Relating Thereto.
 - Chang C C, Wang C M 2014 Evaluating the effects of speed reduce for shipping costs and CO2 emission *Transportation Research Hfirt D: Transport Environmntnt* 31 pp 110-115.
 - Cariou P 2011 Is slow steaming a sustainable means of reducing CO2 emissions from container shipping? *Transportation Research Hfirt D: Transport Environmntnt* 16 pp 260-264.
 - WWW Document 2017 Petra Nova Is One of Two Carbon Capture and Sequestration Power Plants in the World – Today in Energy – U.S. Energy Information Administration. URL <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=33552> (Accessed 28.06.2021).
 - Turkin V A, Pismenskaya Yu V, Ignatenko G V 2021 Carbon dioxide extraction from marine engine exhaust gases by the method of adsorption *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 872 012007.
 - Akhazarova S L, Kafarov V V 1985 Experiment optimization methods in chemical technology (Moscow: Mir) 327.
 - Sovremennye trebovaniya v oblasti zagryazneniya vozduшной srede oksidami sery s sudov / M. A. Modina, E. V. Hekert, A. I. Epihin [i dr.] // *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. – 2021. – № 3(100). – S. 88-91.
 - Kondratyev, S. I. Using telematics data to support effective solutions for tracking and monitoring the power system condition of unmanned vessels / S. I. Kondratyev, A. I. Epikhin // *Journal of Physics: Conference Series*, Novorossiysk, Virtual, 15–16 iyunya 2021 goda. – Novorossiysk, Virtual, 2021. – P. 012089. – DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012089. – EDN QOSRJQ.
 - Kondratyev, S. I. Using telematics data to support effective solutions for tracking and monitoring the power system condition of unmanned vessels / S. I. Kondratyev, A. I. Epikhin // *Journal of Physics: Conference Series*, Novorossiysk, Virtual, 15–16 iyunya 2021 goda. – Novorossiysk, Virtual, 2021.

УДК 621

DOI: 10.34046/aumsuomt104/15

BALLAST WATER TREATMENT SYSTEM A METHOD TO PROTECT THE ENVIRONMENT

Mihail-Vlad VASILESCU, A.I. Epikhin

In order to prevent ecological and environmental disasters resulting from the discharge of ballast water, in 2004 was adopted Ballast Water Management Convention. According to the regulation, ballast water exchange must be conducted at least 200 nm from the nearest land and in waters at least 200 m in depth or in cases where the ship is unable, at least 50 nm from the nearest land and in water at least 200 m in depth or in a designated ballast water exchange area in accordance with the regulation. For costal ships, with are not going far away from shore is almost impossible to comply with D-1 and D-2 standards. For this reason appeared Ballast water treatment system (BWTS). This system neutralizes organisms in the water. International Convention for the Control and Management of Ship's Ballast Water and Sediments sets the rules for ballast water treatment in around 95% of the world's ports. Since 28 October 2020, IMO revised G8 guidelines for type approving ballast water treatment systems went into effect. The ballast water treatment system must be approved by a classification