

УДК 621.6

**ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ УСТРОЙСТВА
ТЕРМИЧЕСКОГО ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ВОД
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОТЫ ВЫПУСКНЫХ ГАЗОВ СУДОВОГО
ДВИГАТЕЛЯ**

Чернов Владимир Александрович¹, аспирант

e-mail: yov7777@bk.ru

Шураев Олег Петрович¹, к.т.н., доцент

e-mail: solwrk@inbox.ru

Чичурин Александр Геннадьевич¹, к.т.н., доцент

e-mail: alex1.chich@yandex.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Разработано устройство термического обезвреживания нефтесодержащих вод, предназначенное для подачи нефтесодержащих вод в поток высокотемпературных выпускных газов судового дизеля. Конструкция установки обеспечивает испарение водной фазы, термическое разложение и окисление нефтепродуктов за счёт интенсивного тепло- и массообмена в газоходе. В состав установки входят участок газохода с форсункой распыла, системой регулирования подачи нефтесодержащих вод, элементами защиты двигателя и контрольно-измерительная система для регистрации параметров процесса обезвреживания. Выполнен анализ влияния угла установки форсунки на распространение факела распыла нефтесодержащих вод в газоходе.

Ключевые слова: Термическое обезвреживание нефтесодержащих вод, устройство термического обезвреживания нефтесодержащих вод, нефтесодержащие воды.

**PROPOSALS FOR THE TECHNICAL IMPLEMENTATION OF A DEVICE FOR
THERMAL NEUTRALIZATION OF OILY WATERS USING THE HEAT OF
EXHAUST GASES FROM A MARINE ENGINE**

Vladimir A. Chernov¹, Doctoral Student

e-mail: yov7777@bk.ru

Oleg P. Shurayev¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

e-mail: solwrk@inbox.ru

Alexander G. Chichurin¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

e-mail: alex1.chich@yandex.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. A device for thermal neutralization of oil-containing waters has been developed, designed for feeding oil-containing waters into the flow of high-temperature exhaust gases of a ship diesel engine. The design of the installation ensures evaporation of the aqueous phase, thermal

decomposition, and oxidation of petroleum products due to intensive heat and mass transfer in the gas duct. The installation includes a section of the gas duct with a spray nozzle, a system for regulating the supply of oil-containing waters, engine protection elements, and a control and measuring system for recording the parameters of the neutralization process. An analysis of the influence of the nozzle installation angle on the spread of the oil-containing water spray flame in the gas duct has been performed.

Keywords: Thermal neutralization of oil-containing waters, device for thermal neutralization of oil-containing waters, oil-containing waters.

Способ термического обезвреживания нефтесодержащих вод представляет собой технологический процесс обработки загрязнённой водной среды путём воздействия на неё высоких температур. В результате такого воздействия происходят интенсивное испарение воды, термическое разложение (пиролиз) и окисление органических примесей, содержащихся в составе нефтесодержащих вод. Это особенно важно, поскольку на практике ни один из применяемых на судах методов очистки не обеспечивает полного удаления нефтепродуктов [1–7], тогда как даже незначительные остаточные концентрации (например, 1 мг/л) способны оказывать негативное воздействие на водные экосистемы. Это делает актуальным развитие способов полной нейтрализации остаточных нефтепродуктов, одним из которых является термическое обезвреживание.

Рассматриваемый способ основан на распылении НСВ в газодыпускной тракт судового двигателя. Под действием высокой температуры происходит последовательное испарение воды, термическое разложение и дожигание нефтепродуктов [7, 8].

Для реализации данного способа на судовом двигателе спроектирована установка обезвреживания (рис. 1), позволяющая осуществлять подачу нефтесодержащих вод непосредственно в поток выпускных газов двигателя, и представлена ее схема (рис. 2).

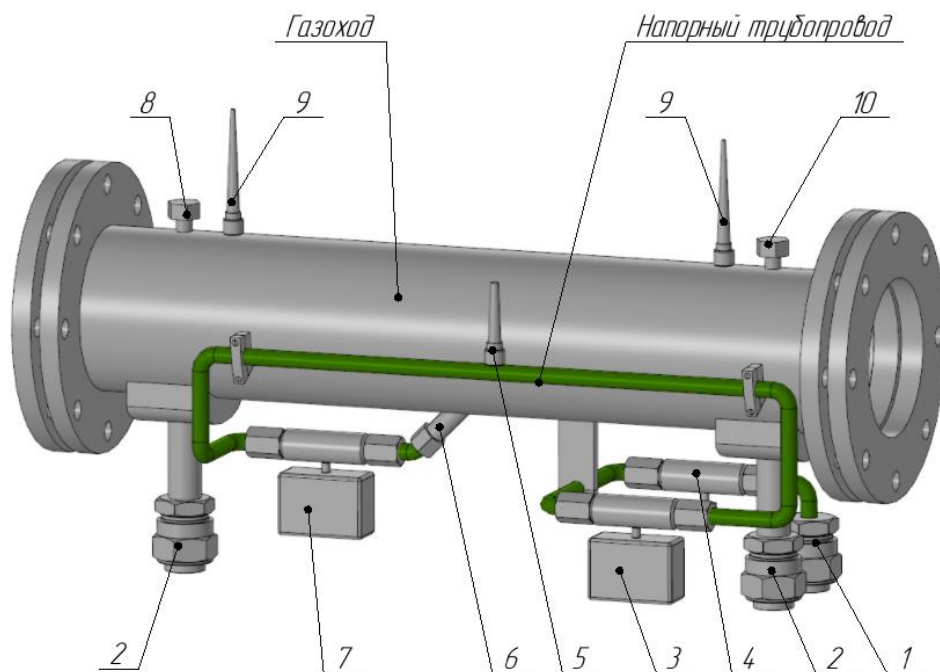


Рисунок 1 – Установка термического обезвреживания нефтесодержащих вод:

1 – подключение к судовой системе (Ду 25), 2 – патрубок отвода НСВ (Ду 25), 3 – регулирующий клапан, 4 – запорная арматура (ручная), 5 – датчик давления, 6 – форсунка распыления НСВ, 7 – отсечной клапан, 8 – штуцер отбора газовых проб до впрыска, 9 – термопара, 10 – штуцер отбора газовых проб после впрыска

Экспериментально установлено, что основная зона протекания реакций в газоходе составляет около 900 мм, что было учтено при разработке конструкции устройства.

Конструкция установки позволяет решать следующие задачи:

- определение температуры потока выпускных газов;
- дозированную подачу и контроль массового расхода НСВ;
- обеспечение безопасных условий проведения процесса обезвреживания НСВ на судовом двигателе;
- подключение и использование необходимой контрольно-измерительной аппаратуры.

Установка включает в себя следующие основные элементы: напорный трубопровод, газоход и блок регистрации измерений (рис. 1, 2).

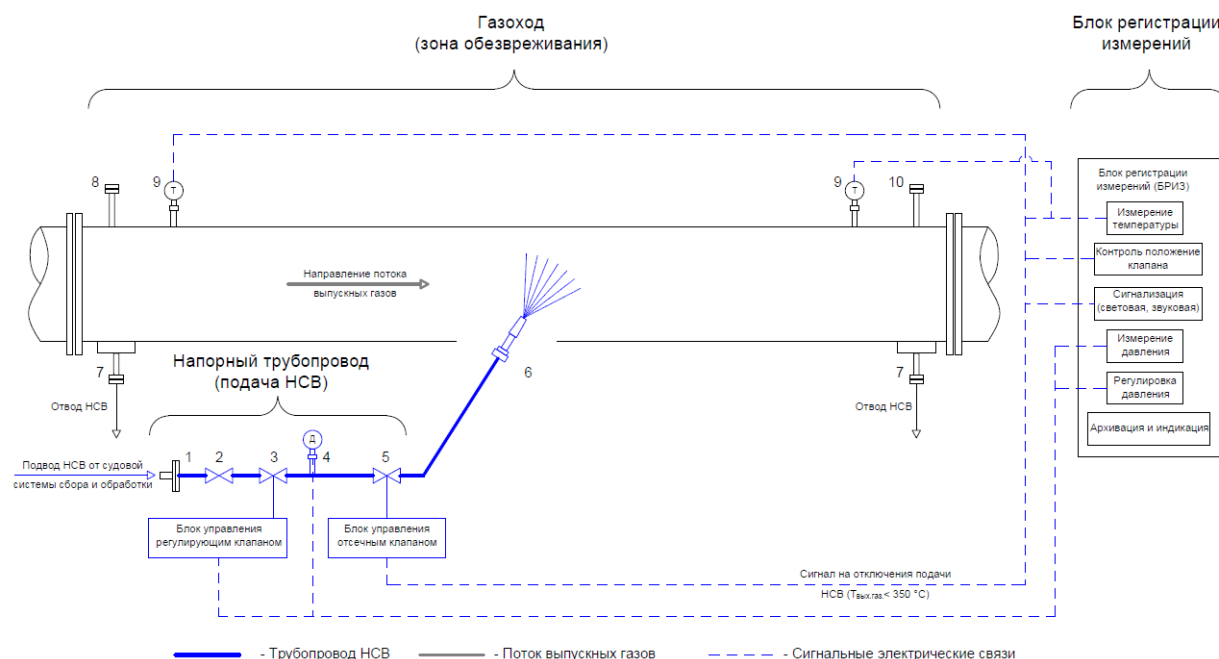


Рисунок 2 – Схема устройства термического обезвреживания нефтесодержащих вод:
1 – подключение к судовой системе (Ду 25), 2 – запорная арматура (ручная), 3 – регулирующий клапан, 4 – датчик давления, 5 – отсечной клапан, 6 – форсунка распыла НСВ, 7 – патрубок отвода НСВ (Ду 25), 8 – штуцер отбора проб до впрыска, 9 – термopар, 10 – штуцер отбора проб после впрыска

Газоход установки выполнен в виде трубчатого канала, по которому осуществляется направленное движение потока выпускных газов судового двигателя. Внутри газохода формируется зона взаимодействия распылённых нефтесодержащих вод с высокотемпературным газовым потоком.

Для контроля параметров процесса на газоходу установлены термopары и штуцера для отбора проб газовой среды, предназначенные для измерения состава выпускных газов и дымности до и после подачи нефтесодержащих вод.

В начале и в конце газохода установлены штуцеры Ду25, предназначенные для отвода не полностью обезвреженных НСВ. Их наличие позволяет предотвратить накопление жидкости в газоходу и обеспечивает безопасную эксплуатацию установки.

Блок регистрации измерений предназначен для сбора, обработки и хранения данных о параметрах процесса. В блоке фиксируются значения температуры выпускных газов, давление подачи НСВ, а также информация о режиме работы установки. Полученные данные используются для анализа условий протекания процесса термического

обезвреживания нефтесодержащих вод.

Напорный трубопровод предназначен для подачи НСВ от судовой системы сбора и обработки НСВ к форсунке впрыска.

Подключение к судовой системе осуществляется через штуцер Ду25. Для регулирования параметров подачи установлен регулирующий клапан, обеспечивающий поддержание необходимого давления подаваемого НСВ. Управление клапаном осуществляется по сигналу от датчика давления размещённым после регулирующего клапана.

С целью обеспечения безопасной эксплуатации системы установлен отсечной клапан, автоматически перекрывающий подачу НСВ при снижении температуры отработавших газов ниже 350 °С. Управление клапаном, осуществляется по сигналу от термодатчиков, размещённых на газоходе. При понижении температуры ниже установленного значения на блок регистрации измерений также поступает световой сигнал, предупреждающий о необходимости отключения насоса подачи НСВ.

Кроме того, на напорном трубопроводе предусмотрена запорная арматура, предназначенная для ручного перекрытия подачи НСВ при проведении технического обслуживания или остановке установки.

Для обеспечения эффективной работы предложенного устройства должен быть обеспечен максимально возможный объем, в котором осуществляется контакт, впрыскиваемых НСВ и ОГ дизеля. Этот объем в свою очередь определяется углом наклона форсунки, через которую подаются в газоход НСВ.

Подача НСВ в поток выпускных газов осуществляется через форсунку с возможностью генерации капель диаметром 0,2 мм, с углом распыла 60 градусов, установленную под углом к направлению движения газового потока. Такое расположение обеспечивает интенсивное перемешивание распылённого НСВ с потоком газов и увеличение площади межфазного тепло- и массообмена.

Для оценки распределения НСВ в потоке горячих газов смоделирован факел распыла НСВ при различном наклоне форсунки в газоходе (рис. 3).

Для оценки распределения НСВ в потоке выпускных газов выполнено моделирование факела распыла при различных углах наклона форсунки: 35°, 40°, 45°, 60° и 90°.

Следует отметить, что моделирование факела распыла при угле установки форсунки 30° не проводилось. Предварительный анализ геометрии распространения факела показал, что дальнейшее уменьшение угла наклона форсунки приводит к увеличению объёма распыла и степени заполнения пространства газохода. Однако при таком расположении форсунки существенно возрастает вероятность контакта капель НСВ с внутренней поверхностью газохода до завершения процессов их нагрева, испарения и термического разложения. В результате возможно образование жидкой плёнки на стенках газохода, что снижает эффективность теплообмена между каплями и потоком выпускных газов и может негативно сказаться на полноте термического обезвреживания НСВ. В связи с этим угол установки форсунки 35° был принят в качестве минимально допустимого значения, обеспечивающего высокий коэффициент заполнения пространства газохода при сохранении условий бесконтактного распространения факела распыла в объёме газового тракта.

Моделирование позволило определить геометрию факела распыла и степень перекрытия поперечного сечения газохода. Полученные результаты показывают, что изменение угла наклона форсунки существенно влияет на равномерность распределения НСВ.

Для оценки влияния угла установки форсунки на условия распространения нефтесодержащих вод в потоке выпускных газов было выполнено моделирование факела распыла при различных значениях угла наклона форсунки. В качестве критерия



эффективности использовался коэффициент заполнения пространства газохода факелом распыла:

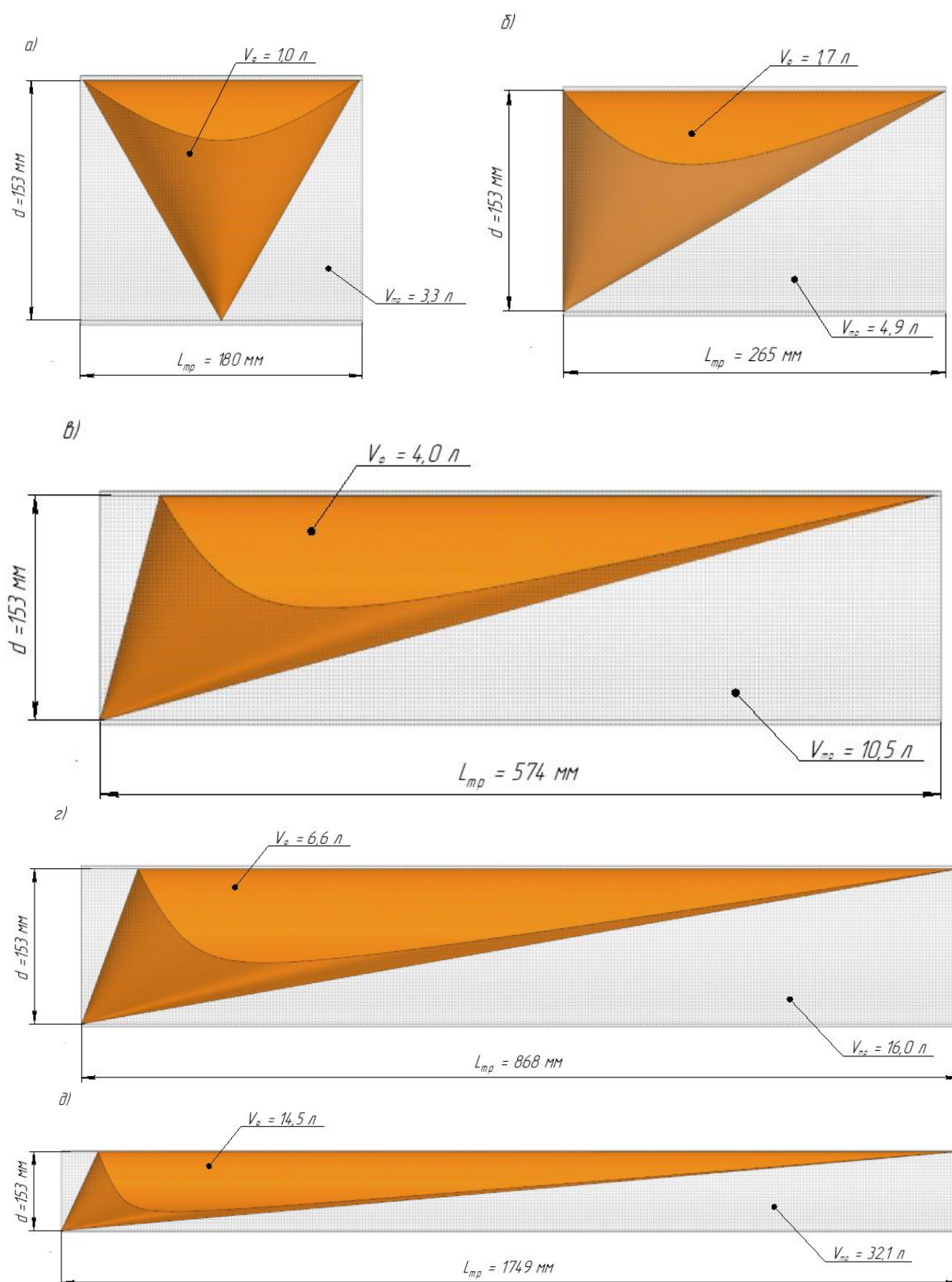


Рисунок 3 – Геометрическая модель распространения факела распыла НСВ: Угол наклона форсунки а) 90°; б) 60°; в) 45°; г) 40°; д) 35°

$$\varepsilon = \frac{V_{\phi}}{V_{\text{тр}}}$$

где V_{ϕ} – объём факела распыла, $V_{\text{тр}}$ – объём газохода, необходимый для распространения капель.

Результаты представлены в таблице 1. Анализ полученных данных показывает, что с увеличением угла наклона форсунки коэффициент заполнения пространства газохода последовательно уменьшается. Так, при угле наклона 35° коэффициент заполнения составляет 0,45, тогда как при увеличении угла до 90° его значение снижается до 0,30, что соответствует уменьшению примерно на 33 %.

Таблица 1. Результаты моделирования факела распыла НСВ при различных углах наклона форсунки

θ	35°	40°	45°	60°	90°
V_{ϕ} , л	14,5	6,6	4,0	1,7	1,0
$V_{\text{тр}}$, л	32,1	16,0	10,5	4,9	3,3
$\varepsilon = \frac{V_{\phi}}{V_{\text{тр}}}$	0,45	0,41	0,38	0,35	0,30

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наиболее благоприятные условия для равномерного распределения капель по объёму газохода достигаются при углах наклона форсунки $35\text{--}45^{\circ}$. В данном диапазоне обеспечиваются максимальные значения коэффициента заполнения пространства газохода, что способствует интенсификации процессов тепло- и массообмена между каплями нефтесодержащих вод и потоком выпускных газов и создаёт наиболее благоприятные условия для их термического обезвреживания.

Применённые в конструкции установки технические решения разработаны с учётом опыта эксплуатации лабораторного стенда термического обезвреживания нефтесодержащих вод [9] и адаптированы для работы в составе выпускной системы судового дизеля. Это обеспечивает надёжность работы установки и возможность её практического применения в судовых энергетических установках.

Выводы

- 1) Предложена конструкция устройства термического обезвреживания нефтесодержащих вод, предназначенная для работы в газовыпускной системе судового дизеля.
- 2) Применённые в конструкции технические решения основаны на результатах эксплуатации лабораторного стенда и учитывают особенности процесса термического обезвреживания.
- 3) Выполненное моделирование факела распыла НСВ позволило оценить влияние угла наклона форсунки на распределение капель в газоходе.
- 4) Разработанная конструкция обладает технологической реализуемостью и может рассматриваться как перспективное решение для практического применения в судовых энергетических установках.



Список литературы:

1. Истомин, В. И. Разработка и анализ экологической модели судовой энергетической установки и методика расчета оптимальной производительности систем очистки нефтесодержащих вод / В. И. Истомин, В. М. Цалоев, В. В. Хлебникова // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 1-1(47). – С. 72-78. – DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.005.
2. Ходжаев, С. С. Современные процессы и установки для очистки судовых нефтесодержащих вод / С. С. Ходжаев, Н. А. Страхова // Эксплуатация морского транспорта. – 2019. – № 4(93). – С. 91-99. – DOI 10.34046/aumsnomt93/16. – EDN IHJNPS.
3. Тихомиров Г.И. Технологии обработки воды на морских судах. Владивосток, Мор. гос. ун-т, 2013. 159 с.
4. Методы утилизации нефтяных шламов / И. Ш. Хуснутдинов, А. Г. Сафиулина, Р. Р. Заббаров, С. И. Хуснутдинов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58. – № 10. – С. 3-20. – EDN UQCSGR.
5. Ксенофонтов, Б. С. Флотационная обработка воды, отходов и почвы. М.: Новые технологии, 2010. 272 с.
6. Писарев, А. О. Актуальные проблемы очистки судовых нефтесодержащих вод / А. О. Писарев, А. С. Курников // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2009. – № 27. – С. 97-108. – EDN ROBTXF.
7. Чернов В.А., Бевза Д.И., Шураев О.П., Чичурин А.А. Методы очистки нефтесодержащих вод // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. №. 3. С. 50-59. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-3-50-59>. – EDN FYYMJR.
8. Чичурин А.Г., Шураев О.П. Утилизация нефтесодержащих вод теплотой отработавших газов судовых дизелей. // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2016. – № 47. – С. 201-206. – EDN WCAZJB.
9. Доводочные испытания стенда термического обезвреживания судовых нефтесодержащих вод / В. А. Чернов, О. П. Шураев, А. Г. Чичурин, Ю. Р. Гуро-Фролова // Научные проблемы водного транспорта. – 2024. – № 80. – С. 77-88. – DOI 10.37890/jwt.vi80.513. – EDN LMDEDR.

