

УДК 621.6.03

DOI: 10.37890/jwt.vi73.314

## **Стенд для исследования термического обезвреживания нефтесодержащих вод**

**В.А. Чернов<sup>1</sup>**

**О.П. Шураев<sup>1</sup>**

**А.Г. Чичурин<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

**Аннотация.** Разработан стенд для исследования процесса термического обезвреживания нефтесодержащих вод. Описаны конструктивные особенности стенда, позволяющего имитировать условия в газоходе дизеля. Сформулированы задачи эксперимента и приведены характеристики измерительных средств стенда. Представлены первые результаты экспериментального исследования термического обезвреживания нефтесодержащих вод. Главными результатами первой серии исследований на стенде являются полученные данные по составу выпускных газов и температурах в газоходе. Выполнено их сравнение с аналогичными параметрами, измеренными в газоходах судовых дизелей типа Г70-5, и газового двигателя 8ГЧН22/28, при их работе на номинальном (или близком к нему) режиме.

**Ключевые слова:** Лабораторный стенд, нефтесодержащие воды, термическое обезвреживание, анализ вредных выбросов в отработавших газах, эффективность очистки.

## **Stand for the study of thermal neutralization of oily waters**

**Vladimir A. Chernov<sup>1</sup>**

**Oleg P. Shurayev<sup>1</sup>**

**Alexander G. Chichurin<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia.*

**Abstract.** A stand has been developed for the study of thermal neutralization process of oily waters. The design features of the stand, which allows simulating conditions in the diesel flue, are described. The tasks of the experiment are formulated and the characteristics of the measuring instruments of the stand are given. The first results of an experimental study of thermal neutralization of oily waters are presented. The main results of the first series of experiments at the stand are the data obtained on the composition of exhaust gases and temperatures in the flue. These parameters are compared with similar parameters measured in the flues of ship diesel engines of the G70-5 type and the 8GCHN22/28 gas engine, when they operate in nominal mode (or close to it).

**Keywords:** Laboratory stand, oily waters, thermal neutralization, analysis of harmful emissions in exhaust gases, cleaning efficiency.

### **Введение**

Многообразие способов утилизации нефтесодержащих вод (НСВ) не гарантирует полную очистку воды от нефтепродуктов. Современные установки очистки НСВ обеспечивают остаточное нефтесодержание 1...10 ppm [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Хотя большинство из них соответствуют действующим национальным и международным

нормам, некоторое количество нефтепродукта, тем не менее, попадает в водную среду.

Полное разделение компонентов возможно только в ходе фазовых переходов одного из них [7]. Например, полную утилизацию нефтепродуктов обеспечивает способ термического (огневого) обезвреживания. Он реализован в установке по сжиганию жидких отходов «Вихрь» [8], где температура сжигания составляет 800...1100 °С. Недостатком данной установки, является большой расход топлива для обеспечения полного окисления токсичных веществ и высокая себестоимость процесса в целом.

В связи с этим поиск эффективных способов обезвреживания НСВ является актуальным. Одним из перспективных является способ, заключающийся в термическом (огневом) обезвреживании НСВ путем распыления на специальном участке в газовыпускной системе судового дизеля. Там происходит нагревание НСВ теплотой отработавших газов, испарение воды и последующее разложение и дожигание нефтеостатка [9, 10].

Данное направление малоизучено, в особенности с позиций его применимости в условиях судовой энергетической установки, что предопределило цель исследования как экспериментальное подтверждение возможности огневого (термического) обезвреживания НСВ на базе судового энергетического оборудования.

Детально исследовать данный способ непосредственно на двигателе в настоящее время весьма проблематично из-за высоких рисков нарушения работоспособности двигателя вследствие недостаточности информации по режимам совместной работы двигателя и утилизационного устройства, что предопределило проведение исследований на данном этапе на специализированном стенде.

Задачами исследования являются:

- получение данных по составу выпускных газов в случае использования данного варианта термического (огневого) обезвреживания и определение пределов работоспособности установки;
- оценка затрат энергии на реализацию данного способа;
- определение факторов, влияющих на критерии эффективности.

#### **Испытательный лабораторный стенд**

Для проведения исследований термического (огневого) обезвреживания НСВ спроектирован (рис. 1) и изготовлен (рис. 2) лабораторный стенд. Он позволяет создавать газовую среду, близкую по параметрам к отработавшим газам судового двигателя и имитировать процессы, происходящие в его газовыпускной системе.

Лабораторный стенд позволяет решить следующие задачи: устанавливать и регулировать температуру выпускных газов, устанавливать и регулировать массовый расход образцов НСВ для обезвреживания, обеспечивать безопасность при проведении испытаний, исключить влияние возможной разрегулированности дизеля, обеспечивая тем самым воспроизводимость экспериментов, и использовать необходимый комплект измерительной аппаратуры.

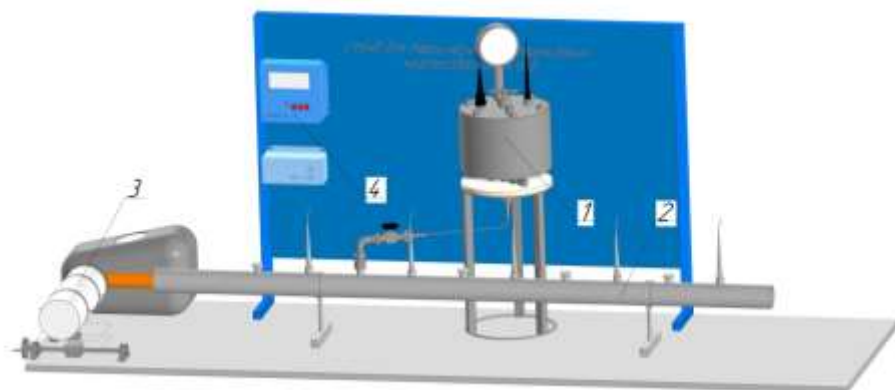


Рис. 1. Модель стенда для проведения экспериментального исследования:  
1 - напорный бак, 2 - газоход, 3 - источник горячих газов и 4 - блок регистрации измерений

Стенд состоит из напорного бака, газохода, источника горячих газов и блока регистрации измерений.

Верхняя часть напорного бака покрыта крышкой, в которую установлены термопара, датчик давления и дублирующий местный манометр МТ5. Сигнал с термопары и датчика давления передается на блок регистрации измерений. Для возможности перекрытия потока НСВ и быстрой смены образцов НСВ установлены запорный клапан и горловина. В боковой части напорной камеры установлен ниппель для соединения с компрессором, что позволяет создавать и регулировать давление в системе подачи НСВ. В нижней части напорной камеры расположен напорный трубопровод, соединяющийся с газоходом. Расход НСВ определяется массовым способом. Для этого напорный бак установлен на платформу с тремя тензоизмерительными датчиками, сигнал с которых передается на блок регистрации измерений.

Газоход состоит из трубопровода с установленными на нем 5-ю термопарами с шагом 300 мм, штуцерами для замера состава выпускных газов и дымности в начале и в конце газохода. Замеры производятся посредством газоанализатора АГМ-510МВ и дымомера МЕТА-01МП. Распыление НСВ осуществляется форсункой с диаметром отверстия 0,5 мм. Держатель для форсунки крепится к крышке штуцера изнутри. Такой подход позволяет регулировать ширину распыла факела относительно газового потока.

Источник горячих газов использует в качестве питания газовую горелку, работающую на смеси газов. Регулировка температуры в газоходе осуществляется перемещением суппорта с размещенной на ней газовой горелкой. Контроль температуры образующихся продуктов сгорания выполняется с помощью термопар, расположенных на газоходе. Расход газа определяется массовым способом. Для этого платформа с горелкой смонтирована на тензодатчике, сигнал с которого передается на блок регистрации измерений.

Блок регистрации измерений принимает сигналы со всех датчиков стенда, осуществляет преобразование сигнала из аналогового в цифровой формат, отображает полученные измерения на дисплее, и выполняет их запись через заданный временной интервал.

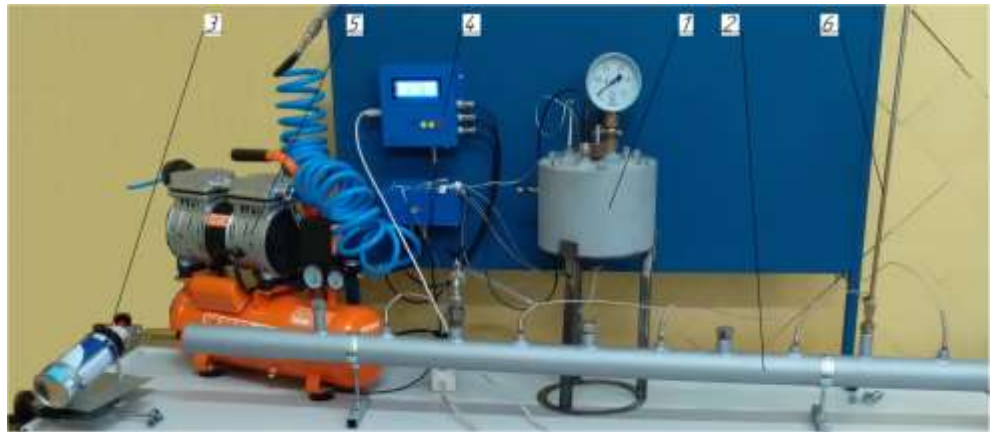


Рис. 2. Стенд для проведения экспериментального исследования: 1 - напорный бак, 2 - газоход, 3 - источник горячих газов, 4 - блок регистрации измерений, 5 - компрессор, 6 - зонд газоанализатора

В ходе экспериментальных исследований управляемыми факторами будут:

- температура газа, измеряемая термопарой, и регулируемая положением газовой горелки относительно переднего среза трубы;
- расход газа в газовой горелке, определяющий энергетические затраты на обезвреживание НСВ данным способом;
- расход НСВ через форсунку, позволяющий оценить производительность стенда и зависящий от давления в баке и величины открытия игольчатого клапана.

В качестве отклика выбран состав выпускных газов (содержание кислорода, углекислого газа, угарного газа, оксидов азота, несгоревших углеводородов), контролируемый с помощью газоанализатора, а также коэффициент избытка воздуха.

Дополнительно в ходе эксперимента предполагается контролировать изменение температуры по длине газохода, для чего в нем предусмотрены места установки термопар, а также возможен контроль температуры поверхности трубы с помощью тепловизионной съемки.

Централизованный мониторинг указанных параметров в ходе эксперимента обеспечивается с помощью специально разработанной автоматизированной системы. Она включает в себя блок регистрации измерений БРИЗ-АТ, модуль термометрирования МТ-06, аналоговый датчик давления, тензометрический датчик измерения веса газового баллона, блок из трех тензометрических датчиков для измерения веса напорного бака.

Модуль измерения температуры МТ-06 позволяет подключить 6 термопар типа К, с верхним пределом измерения 800 °С, разрешением 0,25 °С и погрешностью, определенной по результатам калибровки, не более  $\pm 3$  °С.

Тензометрический датчик измерения веса газового баллона позволяет определить массу газа в баллоне с погрешностью  $\pm 1$  г, причем разность измерений, отнесенная к интервалу времени, позволяет определить расход газа, как мгновенный, так и средний за промежуток времени.

По аналогичному принципу построен и измерительный блок измерения веса напорного бака. В силу большой массы бака его вес пришлось перераспределить по трем датчикам, показания которых сводятся в блоке МВ-03, и далее передаются в блок регистрации измерений БРИЗ-АТ.

Датчик давления имеет рабочий диапазон измерения 0...1,03 МПа, выходное напряжение 0,5...4,5 В, напряжение питания 5 В. Показания датчика давления оцифровываются АЦП контроллера непосредственно в блоке БРИЗ-АТ. Выполненная

калибровка датчика (рис 3) позволила получить зависимость для пересчета уровня сигнала в единицы измерения давления.

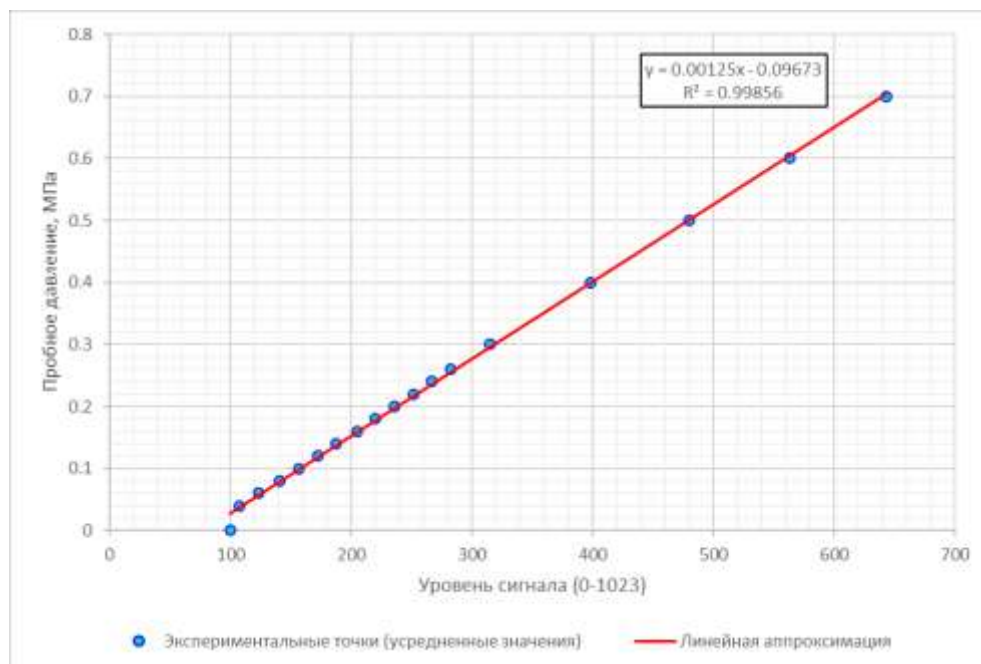


Рис. 3. Калибровочная кривая для датчика давления

Из рис. 3 видно, что зависимость сигнала от давления линейна во всем рассматриваемом диапазоне давлений, а дискретность в 1024 уровня обеспечивает разрешающую способность 1,25 кПа, что вполне достаточно для задания режима работы стенда. Дополнительно, данные с датчика давления контролируются по манометру МТ5, имеющему класс точности 1,5 и предел измерения 1 МПа.

Условия проведения эксперимента отслеживает датчик температуры, атмосферного давления и влажности ВМЕ280, установленный в блоке БРИЗ-АТ.

Блок регистрации измерений БРИЗ-АТ с заданной периодичностью (2 с) собирает данные с датчиков и отображает их на встроенном экране, а также через каждые 5...10 с сохраняет на карту памяти. Большой интервал между записями обусловлен облегчением последующей синхронизации данных с данными газоанализатора АГМ-510МВ, где минимальный интервал между записями составляет 5 с. Для привязки к реальному времени в блоке БРИЗ-АТ установлен RTC-модуль DS3233.

Кроме того, данные с блока БРИЗ-АТ могут быть переданы через СОМ-порт на компьютер. Таким образом, визуализацию данных в числовом и графическом виде, их последующую обработку и архивирование можно выполнить на нем.

### Результаты

Результаты первых настроечных запусков стенда показали, что основные конструкторские решения подтвердили свою работоспособность. Для получения значений контролируемых параметров, которые можно было бы принять за базовые, были выполнены их измерения при работе только газовой горелки без подачи НСВ.

В таблице приведены данные, полученные в ходе испытаний на стенде, и результаты замеров состава выходящих газов на дизелях типа Г70-5 (эффективная

мощность  $P_e = 735$  кВт, частота вращения вала  $n = 350$  об./мин) на одном из теплоходов пр. 301, и газовом двигателе 8ГЧН22/28 ( $P_e = 1000$  кВт,  $n = 1000$  об./мин).

Таблица

**Сравнение параметров выпускных газов на испытательном стенде дизеле Г 70-5 и газовом двигателе 8ГЧН22/28**

Объект	$T_g, ^\circ\text{C}$	$\text{O}_2, \%$	$\text{CO}, \text{ppm}$	$\text{NO}, \text{ppm}$	$\text{NO}_2, \text{ppm}$	$\text{SO}_2, \text{ppm}$	$\text{H}_2\text{S}, \text{ppm}$	$\text{CO}_2, \%$	$\text{CH}, \text{ppm}$	Alf	
8ГЧН22/28	423,4	11,9	654	210	0	0	0	4,7	356	2,14	
Г70-5	правый	309,6	12,3	485	752	16	0	0	6,4	107	2,31
	средний	308,0	11,6	328	1020	26	0	0	7,0	106	2,15
	левый	307,7	11,2	767	1129	30	0	0	7,2	271	2,06
Стенд	193,7*	12,9	26	33	3	0	0	6,0	0	2,49	

\* В последующих пробных запусках стенда удалось достичь температуры газов  $527^\circ\text{C}$

### Обсуждение

Температура продуктов сгорания газового топлива, полученная на стенде соответствует температуре в газоходе двигателей. При этом следует учитывать, что в газоходе двигателя 8ГЧН22/28 температура измерялась на расстоянии 7 диаметров трубы газохода от выпускного фланца турбокомпрессора, а на судне расстояние от двигателя до точки отбора газовой пробы было гораздо больше (оценочно 12...15 диаметров). В конструкцию стенда изначально заложена возможность регулирования температуры газа как изменением расхода топлива (газа), так и положением газовой горелки относительно среза трубы. При этом также будет изменяться коэффициент избытка воздуха (Alf). В настроечных запусках он несколько больший, чем в газоходе двигателей, но, по нашему мнению, эта разность не является критичной.

Концентрация  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , а также значение коэффициента избытка воздуха показывают, что применение газовой горелки в качестве источника горячих газов вполне успешно имитирует условия газораспределительного тракта судовых дизелей.

При работе стенда на газе (пропан-бутановая смесь) газоанализатором не было зафиксировано присутствие углеводородов СН в газоходе. То есть можно говорить о практически полном сгорании газа из баллона в газоходе рассматриваемого стенда. Это подтверждается и невысокой, значительно меньшей по сравнению с двигателями, концентрацией угарного газа СО. Из-за специфики метода термического обезвреживания концентрация СН может служить индикатором качества процесса: появление значительного количества углеводородов говорит о переходе нефтепродуктов в газообразную фазу без последующего разложения и окисления, и, следовательно, ставит под вопрос применимость данного способа. И, наоборот, в случае низких концентраций СН в выпускных газах при работе стенда с введением НСВ можно говорить о ее качественной утилизации данным способом. Таким

образом, отсутствие СН в выпускных газах стенда делает эксперимент более «чистым» по сравнению с экспериментом непосредственно на двигателе.

Также сжигание газового топлива на стенде обеспечивает меньший выброс оксида азота NO (с его последующей трансформацией в NO<sub>2</sub> [11]) по сравнению со сжиганием в двигателях жидкого и газообразного топлива. Поскольку на стенде нет резкого охлаждения продуктов сгорания с уменьшением давления, как это имеет место в двигателях внутреннего сгорания на такте «рабочий ход», «закалки» концентрации NO [12] не происходит, и она остается существенно ниже, чем в газоходе газового двигателя 8ГЧН22/28 и, тем более, в газоходе двигателей Г70-5. То есть, отличие концентрации оксидов азота NO и NO<sub>2</sub> не является препятствием для проведения экспериментальных исследований по термическому обезвреживанию на рассматриваемом стенде.

Концентрация серосодержащих газов SO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>S во всех случаях оказалась равной нулю, что говорит о работе судовых дизелей Г70-5 на обессеренном топливе, и об отсутствии сернистых соединений в газовом топливе для двигателя 8ГЧН22/28.

### **Выводы**

Выполненные настроечные запуски стенда показали, что

- 1) стенд подготовлен для проведения испытаний огневого (термического) обезвреживания нефтесодержащих вод;
- 2) основные конструкторские решения подтвердили свою работоспособность;
- 3) параметры продуктов сгорания на стенде при работе на газе без подачи НСВ по большинству значений соответствуют параметрам продуктов сгорания судовых дизелей и газовых двигателей, следовательно, стенд вполне успешно имитирует условия их газовыпускного тракта.

Результаты настроечных запусков позволяют перейти в ближайшей перспективе к планированию многофакторного эксперимента. Полученные данные о составе продуктов сгорания газа на стенде без подачи НСВ станут эталонными для последующих экспериментов.

### **Список литературы**

1. 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 IHNJNS.
2. Тихомиров Г.И. Технологии обработки воды на морских судах. Владивосток, Мор. гос. ун-т, 2013. 159 с.
3. 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.
4. Ксенофонтов, Б. С. Флотационная обработка воды, отходов и почвы. М.: Новые технологии, 2010. 272 с.
5. 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 ROVTXF.
6. 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>.

7. Кувшинников, И. М. Устойчивость эмульсий нефтепродуктов в воде и способы их коагуляции / И. М. Кувшинников, Е. В. Черепанова // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – № 3(59). – С. 50-58. – EDN КТОНВХ.
8. Калинина, Е. В. Анализ методов обезвреживания нефтесодержащих отходов / Е. В. Калинина, А. Г. Кочкина // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика. – 2013. – Т. 1. – С. 85-99. – EDN SNNOSD.
9. 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.
10. Пат. на полезную модель №151927 Россия, МПК F01N 3/029. Дизельная установка / А.Г. Чичурин, О.П. Шураев, М.Х. Садеков, В.Н. Власов – № 2014 121199/06. Заявл. 26.05.2014; Опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11.
11. Кавтарадзе, Р. З. Влияние вида газообразного топлива на экологические показатели дизеля, конвертированного в двухтопливный двигатель. / Р. З. Кавтарадзе // Транспорт на альтернативном топливе. – 2011. – № 1(19). – С. 57-62. – EDN NCHWWN.
12. Камалтдинов, В. Г. Исследование образования оксидов азота в дизелях и HCCI-двигателях. / В. Г. Камалтдинов, В. А. Марков // Транспорт на альтернативном топливе. – 2015. – № 5(47). – С. 34-46. – EDN UMHAKP.

#### References

1. Hodzhaev, S. S. Sovremennye processy i ustanovki dlja ochistki sudovyh neftesoderzhashhih vod. / S. S. Hodzhaev, N. A. Strahova // Jekspluatacija morskogo transporta. – 2019. – № 4(93). – С. 91-99. – DOI 10.34046/aumsnomt93/16. – EDN IHJNPS.
2. Tihomirov G.I. Tehnologii obrabotki vody na morskix sudax. Vladivostok, Mor. gos. un-t, 2013. 159 s.
3. Metody utilizacii neftejnyh shlamov. / I. Sh. Husnutdinov, A. G. Safiulina, R. R. Zabbarov, S. I. Husnutdinov // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Serija: Himija i himicheskaja tehnologija. – 2015. – Т. 58. – № 10. – С. 3-20. – EDN UQCSGR.
4. Ksenofontov, B. S. Flotacionnaja obrabotka vody, othodov i pochvy. M.: Novye tehnologii, 2010. 272 s.
5. Pisarev, A. O. Aktual'nye problemy ochistki sudovyh neftesoderzhashhih vod. / A. O. Pisarev, A. S. Kurnikov // Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta. – 2009. – № 27. – С. 97-108. – EDN ROBTXF.
6. Chernov V. A., Bevza D. I, Shurayev O. P., Chichurin A. A. Metody ochistki neftesoderzhashhih vod. // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Morskaja tehnika i tehnologija. 2022. №. 3. S. 50-59. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-3-50-59>.
7. Kuvshinnikov, I. M. Ustojchivost' jemul'sij nefteproduktov v vode i sposoby ih koaguljacii. / I. M. Kuvshinnikov, E. V. Cherepanova // Jenergoberezenie i vodopodgotovka. – 2009. – № 3(59). – С. 50-58. – EDN КТОНВХ.
8. Kalinina, E. V. Analiz metodov obezvrezhivanija neftesoderzhashhih othodov / E. V. Kalinina, A. G. Kochkina // Jekologija i nauchno-tehničeskij progress. Urbanistika. – 2013. – Т. 1. – С. 85-99. – EDN SNNOSD.
9. Chichurin A.G., Shurayev O.P. Utilizacija neftesoderzhashhih vod teplotoj otrabotavshih gazov sudovyh dizelej. Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta. 2016. №47. S. 201-206.
10. Pat. na poleznuju model' №151927 Rossija, MPK F01N 3/029. Dizel'naja ustanovka / A.G. Chichurin, O.P. Shurayev, M.H. Sadekov, V.N. Vlasov – № 2014 121199/06. Zajavl. 26.05.2014; Opubl. 20.04.2015, Bjul. № 11.
11. Kavtaradze, R. Z. Vlijanie vida gazoobraznogo topliva na jekologičeskije pokazateli dizelja, konvertirovannogo v dvuhtoplivnyj dvigatel' / R. Z. Kavtaradze // Transport na al'ternativnom toplive. – 2011. – № 1(19). – С. 57-62. – EDN NCHWWN.
12. Kamaltdinov, V. G. Issledovanie obrazovanija oksidov azota v dizeljah i HCCI-dvigateljah. / V. G. Kamaltdinov, V. A. Markov // Transport na al'ternativnom toplive. – 2015. – № 5(47). – С. 34-46. – EDN UMHAKP.



**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Чернов Владимир Александрович**, инженер, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, ауд. 667, e-mail: vov7777@bk.ru

**Vladimir A. Chernov**, engineer, Volga state university of water transport, 5, Nesterova str., Nizhny Novgorod, Russia

**Шураев Олег Петрович**, к.т.н., доцент кафедры ЭСЭУ (Эксплуатации судовых энергетических установок) Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, ауд. 667, e-mail: solwrk@inbox.ru

**Oleg P. Shurayev**, Candidate of Technical Science, Assistant Professor, The Department «Operation of Ship Power Plants», Volga state university of water transport, 5, Nesterova str., Nizhny Novgorod, Russia

**Чичурин Александр Геннадьевич**, к.т.н., доцент кафедры ЭСЭУ (Эксплуатации судовых энергетических установок) Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, ауд. 667, e-mail: alex1.chich@yandex.ru

**Alexander G. Chichurin**, Candidate of Technical Science, Assistant Professor, The Department «Operation of Ship Power Plants», Volga state university of water transport, 5, Nesterova str., Nizhny Novgorod, Russia

Статья поступила в редакцию 27.09.2022; опубликована онлайн 20.12.2022.  
Received 27.09.2022; published online 20.12.2022.