

Научная статья
УДК 629.5.068.3:662.994
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-3-50-59>

Методы очистки нефтесодержащих вод

*Владимир Александрович Чернов[✉], Денис Игоревич Бевза, Олег Петрович Шураев,
Александр Геннадьевич Чичурин*

*Волжский государственный университет водного транспорта,
Нижний Новгород, Россия, vov7777@bk.ru[✉]*

Аннотация. Рассматриваются используемые в настоящее время методы очистки судовых нефтесодержащих вод и предлагается новый метод их утилизации. Отображены особенности состава и свойств нефтесодержащих вод, приведены действующие требования по очистке нефтесодержащих вод в зависимости от районов эксплуатации судна. Указаны основные причины появления нефтесодержащих вод, а также перечислены основные факторы, влияющие на образование нефтесодержащих вод на судах. Проиллюстрирован фотоснимок водотопливной эмульсии под микроскопом. Проанализированы используемые на судах методы очистки нефтесодержащих вод, их достоинства и недостатки. Приведено подробное описание способов очистки воды: механическая очистка (процеживание, отстаивание, центрифугирование), физико-химическая очистка (адсорбция, коалесценция, флотация), химическая очистка (озонирование, электрохимическая очистка), биологическая очистка и методы термического обезвреживания, включающие «мокрое сжигание», огневое обезвреживание. Представлена схема первичной очистки нефтесодержащих вод с помощью решетки, одного из методов механической очистки сточных вод, в ходе которого нефтесодержащие воды проходят через многочисленные отверстия и отделяются от посторонних предметов и крупных твердых включений. В качестве другого примера механической очистки сточных вод проиллюстрирована конструкция отстойника с наклонными пластинами, посредством которого поток проходит вдоль пластин и разделяется на слои, что сдерживает перемешивание и способствует процессу отстаивания нефтепродуктов. Представлена также схема коалесцирующего фильтра (физико-химический метод очистки) и описаны его преимущества. Приведена сравнительная характеристика методов утилизации и обезвреживания нефтесодержащих вод. Особое внимание акцентировано на разработках и совершенствовании технологии термического обезвреживания судовых нефтесодержащих вод. Предложен способ утилизации нефтесодержащих вод теплотой отработавших газов судового дизеля.

Ключевые слова: нефтесодержащие воды, эффективность очистки, судовые системы очистки нефтесодержащих вод, механическая очистка, физико-химическая очистка, химическая очистка, биологическая очистка, термическое обезвреживание

Для цитирования: Чернов В. А., Бевза Д. И., Шураев О. П., Чичурин А. Г. Методы очистки нефтесодержащих вод // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 3. С. 50–59. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-3-50-59>.

Original article

Methods of purifying oily waters

Vladimir A. Chernov[✉], Denis I. Bevza, Oleg P. Shurayev, Alexander G. Chichurin

*Volga State University of Water Transport,
Nizhny Novgorod, Russia, vov7777@bk.ru[✉]*

Abstract. The article describes currently used methods of cleaning ship oil-containing waters and suggests a new method of their disposal. There are shown the specific features of the composition and properties of oil-containing waters, current requirements for the purification of oil-containing waters depending on the areas of operation of the vessel. The main reasons for oily waters emerging are given, as well as the main factors affecting the formation of oily waters on ships. A picture of a water-fuel emulsion under a microscope is illustrated. There are analyzed the methods of oil-containing water purification used on ships, their advantages and disadvantages. There is given a particular description of water purification methods: mechanical purification (straining, settling, centrifugation), physico-chemical purification (adsorption, coalescence, flotation), chemical purification (ozonation, electrochemical purification), biological purification and the method of thermal neutralization (wet burning, fire neutralization). There is presented one

of the methods of mechanical wastewater treatment, namely, a scheme for primary treatment of oily waters using a grate, when the oily waters pass through numerous holes and are separated from foreign objects and large solid inclusions. Another example of mechanical wastewater treatment is the design of a clarifier with inclined plates through which the water flow passes along the plates and is divided into layers, which restrains mixing and facilitates settling oil products. A diagram of a coalescing filter (physico-chemical cleaning method) is also presented and its advantages are described. The comparative characteristics of the methods of utilization and neutralization of oily waters are given. Special attention is paid to the development and improvement of the technology of thermal neutralization of ship oil-containing waters. A method of utilization of oily waters by the heat of ship diesel exhaust gases is proposed.

Keywords: oily waters, purification efficiency, marine oily water purification systems, mechanical purification, physico-chemical purification, chemical purification, biological purification, thermal neutralization

For citation: Chernov V. A., Bevza D. I., Shuryayev O. P., Chichurin A. G. Methods of purifying oily waters. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. 2022;3:50-59.* (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-3-50-59>.

Введение

В работах [1–3] отмечается, что примерно третья часть поверхности Мирового океана покрыта нефтяной пленкой, которая оказывает негативное воздействие на окружающую среду. Нефтяная пленка препятствует массо- и теплообмену между атмосферой и гидросферой. Кроме того, токсичность нефти приводит к гибели морских организмов и наносит существенный ущерб местам их обитания. При эксплуатации флота в воды Мирового океана ежегодно поступает около 2 млн т воды, загрязненной нефтепродуктами [1–3]. Для повышения эффективности использования средств по предотвращению загрязнения водной среды нефтепродуктами, усовершенствования технологий процессов очистки судовых нефтесодержащих вод (НСВ), создания новых установок и новых методов необходимо произвести комплексное исследование всех составляющих процесса очистки судовых НСВ.

Материалы исследования

На территории Российской Федерации действуют требования по очистке НСВ в зависимости от районов эксплуатации судна. Согласно требованиям Приложения I Конвенции МАРПОЛ 73/78, которую подписала и Российская Федерация, для судов смешанного плавания (река-море) и морских судов предусмотрено, что «...содержание нефти в сбрасываемом стоке не превышает 15 миллионных долей» [4, с. 88]. Согласно требованиям Правил Российского речного регистра, на судах внутреннего плавания должны быть предусмотрены средства для сбора, хранения и очистки НСВ. Правилами предусмотрено: «...на пассажирских, транспортных и технических флотах, оборудованных станцией очистки НСВ, концентрация нефтепродуктов в стоке не должна превышать значение 8 мг/л, на судах-сборщиках, предназначенных для очистки судовых НСВ, концентрация нефтепродуктов в стоке не должна превышать значение 5 мг/л» [5, с. 45].

Главными факторами, влияющими на образование НСВ в процессе эксплуатации судна, являются тип судна, его техническое состояние и квали-

фикация обслуживающего персонала. Накопление НСВ происходит в результате нарушения герметичности разъемных соединений оборудования, арматуры и трубопроводов, дейдвудного устройства, при конденсации влаги на внутренних поверхностях металлического набора корпуса судна, после промывки деталей и узлов двигателей и различных механизмов во время технических обслуживаний и при ремонтных работах, при мойке водой машинного помещения и т. п. Нефтесодержащие воды представляют собой смесь из воды, топлива, масел, твердых примесей и различных продуктов, используемых в процессе эксплуатации судовой энергетической установки. Средняя плотность нефтепродуктов и воды, содержащихся в подсланевом пространстве машинного отделения (МО), оценивается в границах 0,84–0,98 г/см³. Водородный показатель НСВ pH = 5,9–8,5. Средний показатель содержания механических примесей составляет 0,006 % [6].

В работе [6] указывается, что в НСВ подсланевого пространства МО можно разграничить три слоя:

- первый слой представляет собой непрерывную пленку на поверхности воды;
- второй слой представляет собой эмульсии, где частицы нефтепродукта различного размера находятся во взвешенном состоянии с концентрацией нефтепродуктов от 500 до 3 000 мг/л;
- третий слой представляет собой воду, в которой содержатся растворенные и капельные тяжелые нефтепродукты.

Вместе с тем, по нашему мнению, в ряде случаев можно выделить четвертый слой, представляющий собой смесь тяжелых нефтепродуктов с механическими примесями и незначительным количеством воды.

В процессе очистки НСВ чаще всего применяется комбинированная система очистки, т. к. НСВ представляют собой эмульсию из двух или более взаимно несмешиваемых жидкостей, в которой по меньшей мере одна из жидкостей образует дисперсионную среду, а другая встречается в виде дисперсной фазы, обычно в виде мелких капель, как, например, на рис. 1.

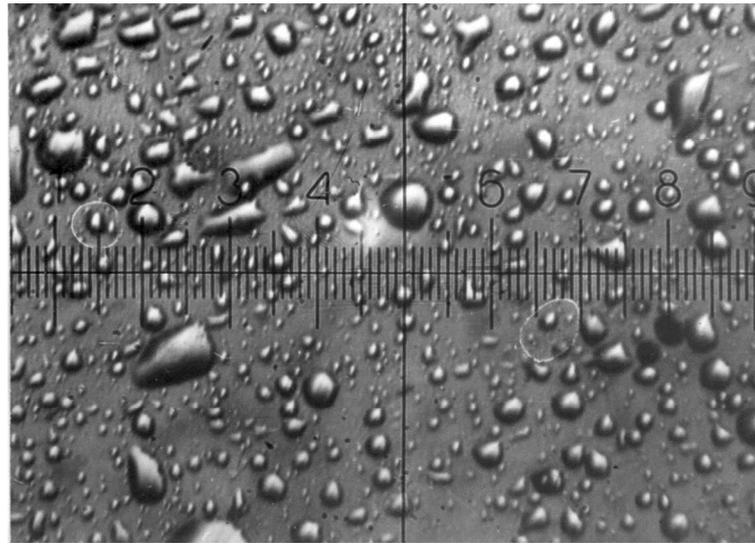


Рис. 1. Водотопливная эмульсия под микроскопом

Fig. 1. Water-fuel emulsion under the microscope

Неустойчивость эмульсий является важной особенностью и способствует процессу разделения при очистке. Неустойчивость эмульсии выражается в самопроизвольном объединении капель. Этот процесс приводит к разрушению эмульсии и раз-

делению на два жидких слоя. В зависимости от метода очистки неустойчивость эмульсии можно разделить на пять групп, как проиллюстрировано на рис. 2.

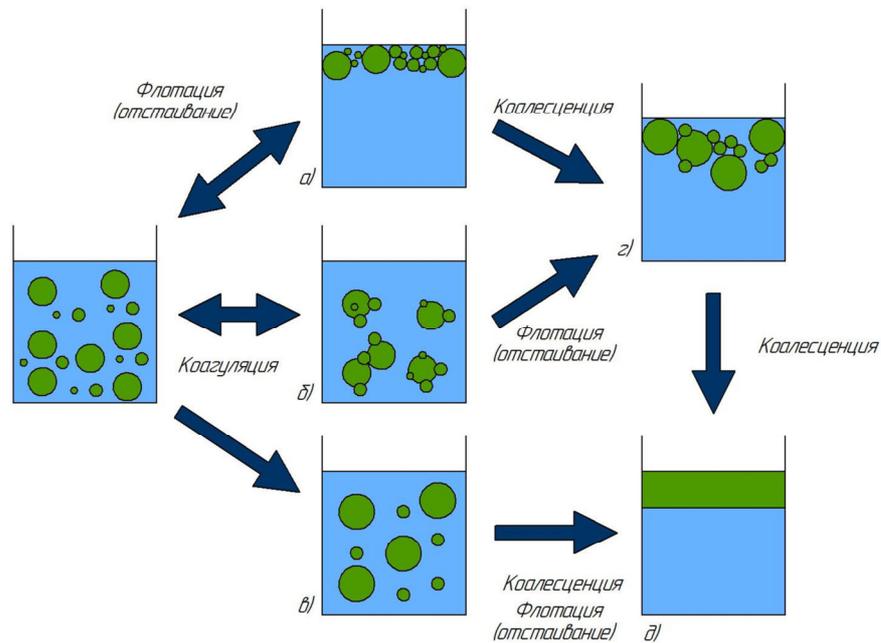


Рис. 2. Состояния нефтесодержащих вод и методы очистки

Fig. 2. Conditions of oily waters and oil treatment methods

Первую группу образуют эмульсии, в которых капли нефтепродукта преимущественно скапливаются на поверхности жидкости. Такие эмульсии получаются в результате отстаивания НСВ, обра-

зованных с участием легких фракций нефтепродуктов. Вторая группа представляет собой эмульсии, где частицы нефтепродукта различного размера находятся во взвешенном состоянии, причем

более крупные частицы ассоциированы с более мелкими. Третья группа состоит из разноразмерных частиц нефтепродукта, равномерно распределенных по всему объему. Четвертую группу НСВ образуют отдельные капли нефтепродукта в виде хлопьев и пены на поверхности. К пятой группе отнесем такие НСВ, где нефтепродукты образуют слой непрерывной пленки на поверхности воды.

Механические методы очистки нефтесодержащих сточных вод

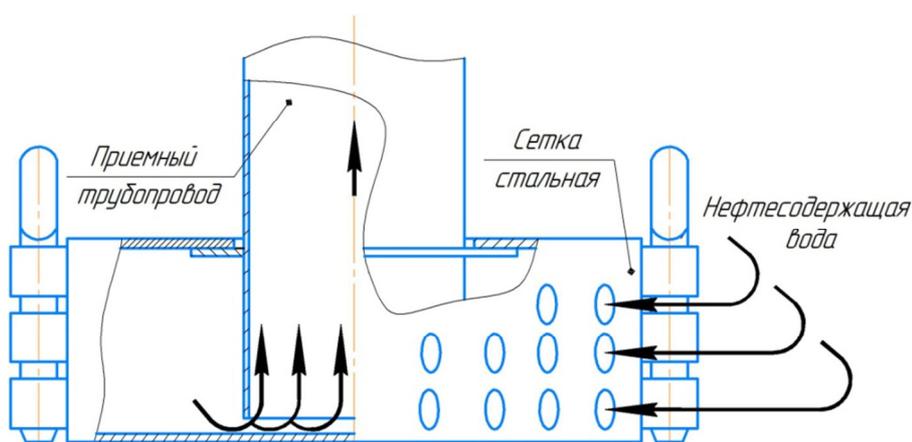


Рис. 3. Первичная очистка нефтесодержащих вод с помощью решетки

Fig. 3. Primary treatment of oily waters with a grate

Проходя через многочисленные отверстия решетки (сита) диаметром от 5 до 20 мм, НСВ отделяются от посторонних предметов и крупных твердых включений.

Отстаивание. Процесс происходит в результате действия несбалансированных гравитационных и плавучих сил, называемых силами Стокса [7, 8]. Если размер капли слишком мал, броуновское движение и электростатические силы влияют на случайное движение капель более значительно и капли не могут всплыть на поверхность. Однако как только капли достигнут некоторого критического размера, сила плавучести будет доминирующей и капли всплывут на поверхность более плотной жидкости. Там они образуют слой из тесно прикрепленных отдельных капель или непрерывной пленки. Данный метод позволяет снизить содержание нефтепродуктов в воде до 100 млн^{-1} .

Для ускорения процесса отстаивания в цистернах устанавливают наклонные пластины, в этом случае агрегация частиц нефтепродукта идет более активно, улучшаются условия осаждения. Расчеты конструкций отстойников представлены в работе [9]. Схема отстойника представлена на рис. 4.

Процеживание. Первичная стадия очистки НСВ предназначена для извлечения из НСВ крупных механических включений (гайки, шайбы, болты и т. д.), а также волокнистых фракций (ветошь), которые могут препятствовать нормальной работе оборудования системы утилизации. Нефтесодержащие воды подсланевого пространства МО, перед тем как попасть в отстойные цистерны, пропускают через решетки (сита). Пример решетки (сита) представлен на рис. 3.

Поток НСВ проходит вдоль пластин и разделяется на слои, в результате чего уменьшается возможность перемешивания. Капли нефтепродуктов двигаются вдоль поверхности пластины и соединяются с другими, в результате чего происходит их укрупнение, что в свою очередь приводит к увеличению силы плавучести. Такое движение потока НСВ делает процесс отстаивания более эффективным. Затем нефтепродукты попадают в нефтеловушку, где происходит их накопление для дальнейшего извлечения, а осветленная вода отводится из отстойника.

Центрифугирование. Процесс очистки основан на действии центробежной силы для разделения компонентов эмульсии в соответствии с их плотностью или размером частиц. Данный вид очистки сопровождается флокуляцией и коалесценцией. Флокуляция – это вид коагуляции, при котором происходит образование рыхлых хлопьевидных агрегатов (флокулов) из маленьких частиц дисперсной фазы, находящихся во взвешенном состоянии в среде. Частицы с меньшим удельным весом перемещаются ближе к центру потока, а с большим удельным весом оттесняются к периферии. Данный метод позволяет снизить содержание нефтепродуктов в воде до $5\text{--}15 \text{ мг/л}$ [10].

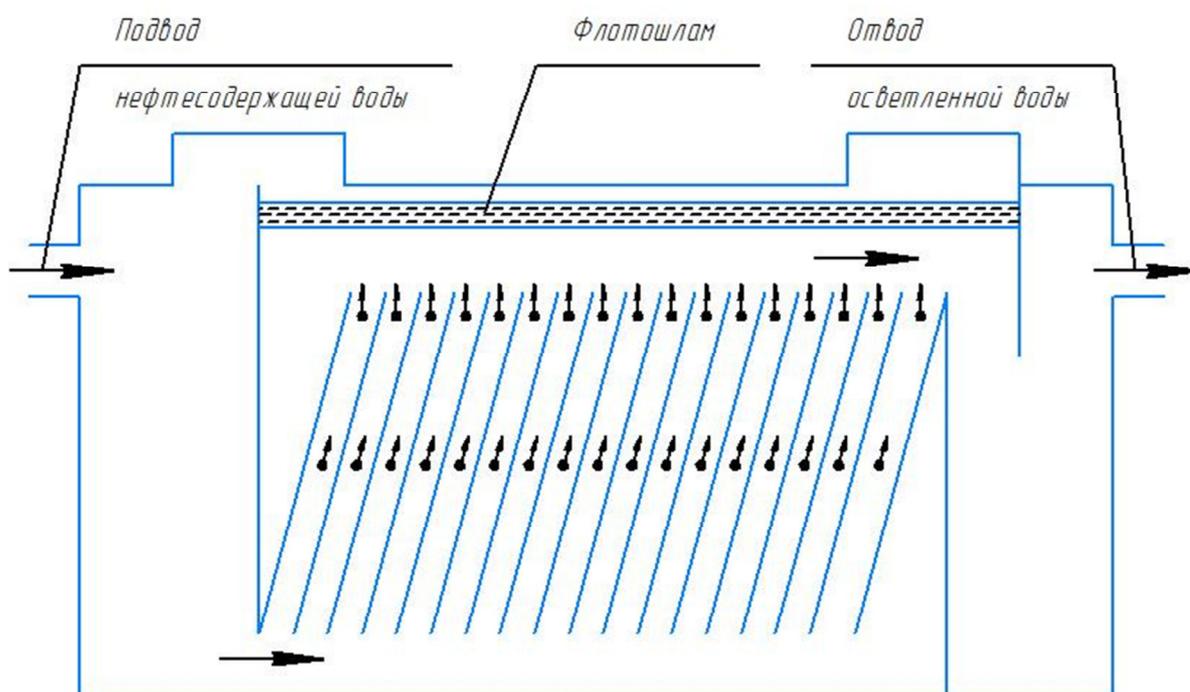


Рис. 4. Отстойник с наклонными пластинами

Fig. 4. Settler with inclined plates

Физико-химические методы очистки нефтесодержащих сточных вод

Адсорбция. Процесс очистки основан на притягивании и объединении частиц нефтепродукта на поверхности адсорбента.

Сорбенты можно разделить на природные (органические, неорганические) и синтетические. Наиболее распространенными природными сорбентами являются лигноцеллюлозные материалы, ореховая скорлупа, торф, активные глины и т. д. Сорбенты на основе синтетических материалов, таких как полипропилен, силикагели, алюмогели, поливинилхлорид, полистирол, активированный оксид алюминия, нейлон, специальные ионообменные смолы, полиэтилен и другие полимеры, способны притягивать нефтепродукты и отталкивать воду.

В результате сил притяжения частицы нефтепродукта удерживаются на поверхности сорбента. Это происходит из-за разности межмолекулярного взаимодействия между молекулами сорбента с молекулами нефтепродукта, а также молекул воды с молекулами нефтепродукта. Чем прочнее взаимосвязь молекул нефтепродукта с молекулами воды, тем хуже адсорбируется нефтепродукт на поверхности сорбента.

Эффективность очистки обусловлена концентрацией нефтепродуктов в воде, выбором адсорбирующего материала, дисперсностью и глубиной

загрузки. Одним из основных условий для эффективной работы адсорбционного фильтра является удаление крупных частиц нефтепродукта из НСВ путем предварительной очистки.

После предварительного удаления из НСВ крупных частиц нефтепродукта данный способ очистки позволяет получить глубину очистки 1–10 мг/л.

Коалесценция. Процесс очистки основан на прохождении разделяемой эмульсии узких мест (отверстий или пор фильтровальной перегородки), при этом дисперсные частицы, находящиеся в эмульсии, сталкиваются, в связи с чем происходит их объединение и укрупнение. Частицы увеличиваются до того момента, пока не увеличится сила плавучести и не поднимет их на поверхность воды. С помощью данного метода можно очистить НСВ до концентрации нефтепродукта 15 млн^{-1} и ниже. Коалесцирующими элементами для фильтров могут служить такие материалы, как песок, поролон, полистирол, полипропиленовые волокна и т. д.

Существенное различие между методами коалесценции и адсорбции состоит в том, что при коалесценции после завершения процесса агрегации крупных капель нефтепродукта необходимы условия для гравитационного отделения их от воды (отстойник), тогда как после адсорбции не требуется выполнять данное условие, вода сразу становится чистой. На рис. 5 представлен эскиз фильтра.

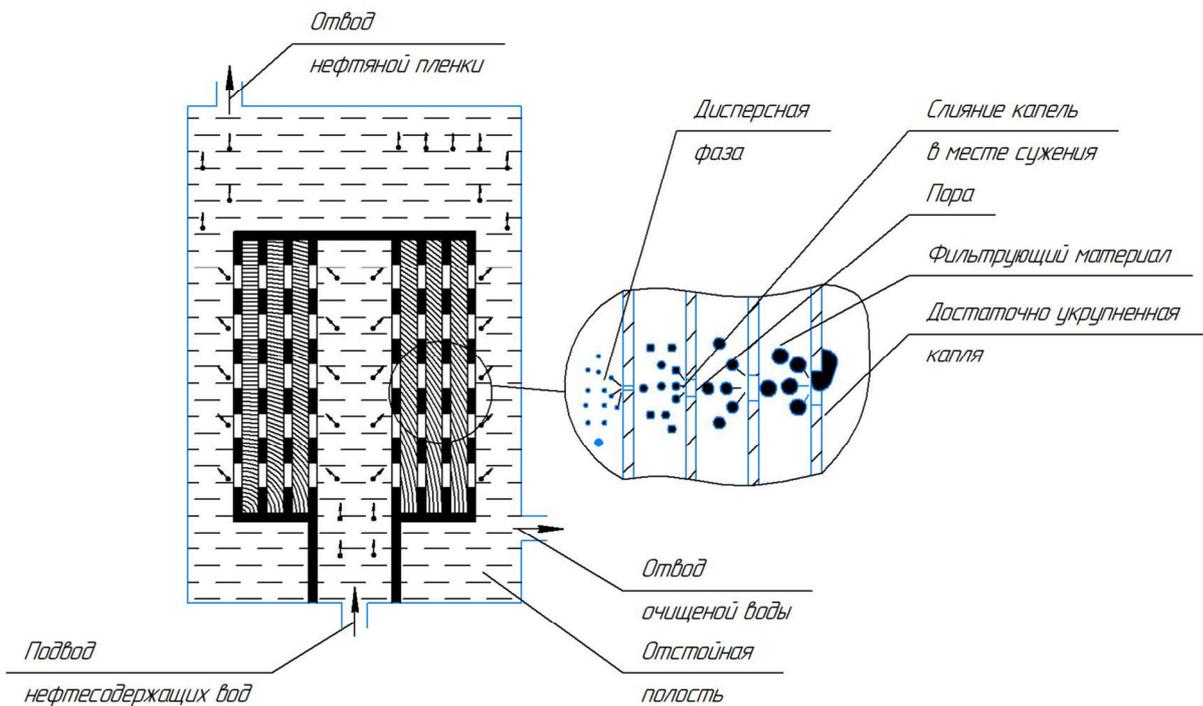


Рис. 5. Коалесцирующий фильтр

Fig. 5. Coalescing filter

Преимуществами данного метода являются больший ресурс фильтра с возможностью его регенерации и непрерывность процесса, т. к. количество НСВ на входе соответствует количеству воды и нефтепродуктов на выходе из рассматриваемого устройства.

Флотация. Метод очистки НСВ флотацией заключается в насыщении объема НСВ пузырьками газа (чаще всего воздуха), которые при всплытии доставляют на поверхность раздела «вода – воздух» загрязнения из НСВ и формируют флотошлам.

При сравнении эффективности процесса флотации с гравитационным методом лучшая результа-

тивность флотации обусловлена тем, что скорость всплытия нефтевоздушного пузырька в 900 раз выше, чем скорость всплытия капли нефтепродукта того же диаметра при гравитационном отстаивании. Как правило, чем мельче пузырьки воздуха, тем выше эффективность флотационного разделения.

Существуют следующие методы флотации: механическая, пневматическая, вакуумная, напорная, электрофлотация, химическая, флотация со струйным аэрированием жидкости, пневмогидравлическая, биологическая, термическая и некоторые другие.

В таблице приведено сравнение различных типов флотации по нескольким показателям [11].

Основные показатели распространенных видов флотации

Main indicators of common types of flotation

Вид флотации	Размер генерируемых пузырьков газа, мкм	Удельные энергозатраты, $Q_{уд}$, (кВт·ч)/м ³	Недостатки
Механическая (импеллерная)	Более 200	0,2–0,3	Большая турбулентность
Электрофлотация	25–80	10–15	Пассивация электродов
Пневматическая	Более 200	0,019–0,042	Забивание пор
Напорная	40–70	1,7–2,8	Наличие сатуратора, наиболее эффективно работает в диапазоне 15–25 °С, обычно используется рабочая жидкость
Пневмогидравлическая	Более 150	0,03–0,2	Обычно используется рабочая жидкость, возможно запыление азратора

Наибольшее распространение в сфере очистки НСВ получили напорная, пневматическая и электрофлотация; реже – механическая и пневмогидравлическая [12–14]. Выбор того или иного способа аэрации связан с такими показателями, как дисперсный состав генерируемых пузырьков газа, производительность и стабильность работы, сложность оборудования, а также капитальные и эксплуатационные затраты.

Химический метод очистки нефтесодержащих сточных вод

Озонирование. Озонирование – технология глубокой очистки НСВ, основанная на использовании окислительной способности атомарного кислорода, который образуется при самопроизвольном распаде озона (O_3). Сама по себе молекула озона нестабильна, может отдавать один свободный атом, образуя при этом простую молекулу кислорода. Свободный атом кислорода является окислителем и, соединяясь с ближайшими молекулами нефтепродукта, разрушает их. При помощи данного метода можно добиться удаления из НСВ эмульсированных и растворенных нефтепродуктов, а также происходит одновременное обесцвечивание, обеззараживание воды и насыщение ее кислородом.

Озон генерируется в результате процесса прохождения потока воздуха или кислорода между электродами. Под действием электрических разрядов высокого напряжения часть молекул кислорода распадается, а образовавшиеся атомы присоединяются к молекулам кислорода: $O_2 + O = O_3$.

Данный способ в последующей фильтрации позволяет получить глубину очистки 1–10 мг/л [9].

Электрохимическая очистка. Метод очистки НСВ основан на электролизе при пропускании через НСВ постоянного электрического тока с помощью погруженных растворимых и нерастворимых электродов. В зависимости от выбранного материала электрода (алюминия, нержавеющей стали, графита, серебра) можно получить различные коагулянты для очистки сточных вод и НСВ. Данный способ очистки называют также электрохимической коагуляцией.

К недостаткам данного способа можно отнести значительный расход металла и электроэнергии, образование в электродных камерах электрических пробоев и зашламление камер.

Степень очистки НСВ электрохимической коагуляцией можно довести до 90 % после доочистки фильтрованием [9].

Биологический метод очистки нефтесодержащих сточных вод

Основой биологического метода очистки явля-

ется способность некоторых микроорганизмов использовать различные вещества, содержащиеся в НСВ, в процессе своей жизнедеятельности для своего развития. Эффективность метода зависит от выполнения следующих условий: содержание нефти в НСВ не может превышать 100 мг/л; температура – 20–25 °С; концентрация кислорода – не ниже 2 мг/л; рН в пределах 6,5–7,5.

Данный способ очистки НСВ не нашел широкого распространения на водном транспорте из-за высокой чувствительности микроорганизмов к составу и количеству воды. К недостаткам этого метода также можно отнести необходимость разбавления НСВ при повышенной концентрации примесей в ее составе. Трудности вызывает и последующая утилизация отработанного активного ила.

Термическое обезвреживание

Метод «мокрого сжигания» (жидкофазное окисление). Такой метод очистки НСВ основан на окислении кислородом органических и элементоорганических соединений при температуре 150–350 °С и давлении 2–28 МПа [15]. Преимуществом данного метода является значительно меньшие энергозатраты, чем при огневом обезвреживании [16]. Недостатком данного метода является неполное окисление отходов и коррозия оборудования.

Огневое обезвреживание. Процесс обезвреживания заключается в распылении НСВ в топочные газы, нагретые до 900–1 000 °С. В результате происходит полное испарение воды и сгорание органических примесей [16, 17].

На стыке указанных методов предлагается вариант термического обезвреживания, применимый на судах. Он заключается в использовании теплоты отработавших газов судовых дизелей и котлов для разложения и нейтрализации НСВ. В зависимости от типа дизеля или котла и режима их работы можно определить, какое количество теплоты можно получить от отработавших газов. В работе [18] отмечено, что использование теплоты отработавших газов на судне составляет 15–30 % от располагаемой, а остальная часть уходит в атмосферу. Согласно одному из вариантов предлагается производить распыление НСВ через форсунку в канал газovýchлопной системы дизеля. Отработавшие газы на выходе из дизеля или турбины комбинированного двигателя имеют достаточно высокую температуру (350–500 °С). Распыленные НСВ вместе с отработавшими газами движутся по каналу, в котором происходит нагрев НСВ отработавшими газами, испарение воды и последующее разложение и дожигание нефтеостатка. Производительность метода будет зависеть от исходного состава отработавших газов, его соответствия требованиям

по выбросам вредных веществ с отработавшими газами до и после введения НСВ. Итоговый состав отработавших газов контролируется газоанализатором, по данным которого может быть автоматизирована подача НСВ на форсунку. Таким образом, данный метод может позволить достичь полной утилизации НСВ [18–21].

Заключение

Выполненный анализ позволяет сделать вывод о том, что эффективность очистки НСВ возрастает при объединении нескольких методов очистки в один технологический процесс. Его промежуточным результатом будет разделение НСВ на нефте-

продукты с небольшим содержанием воды и воды с остаточным содержанием нефтепродуктов. Первые могут сжигаться в котлах и инсинераторах, а для воды с малой концентрацией нефтепродуктов применимо термическое обезвреживание. Оно позволяет эффективнее использовать теплоту отработавших газов судовых дизелей, экономя энергоресурсы, и уменьшить тепловые выбросы в атмосферу. Также применение данного способа позволяет сократить затраты на сдачу НСВ, тем самым снижая себестоимость перевозок, и избежать установки дорогостоящего оборудования для очистки воды до требуемых норм.

Список источников

1. *Истомин В. И.* Комплексная очистка судовых нефтесодержащих вод. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2004. 202 с.
2. *Решняк В. И.* Основы очистки и утилизации нефтесодержащей воды в судовых энергетических установках: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1997. 47 с.
3. *Истомин В. И.* Разработка и анализ экологической модели судовой энергетической установки и методика расчета оптимальной производительности систем очистки нефтесодержащих вод // *Мор. интеллектуал. технологии.* 2020. № 1-1 (47). С. 72–78.
4. *Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973, измененная протоколом к ней 1978 г. (МАРПОЛ 73/78).* М.: ЦНИИМФ, 2012. 762 с.
5. *Правила предотвращения загрязнения окружающей среды с судов / Российский речной регистр.* М.: Изд-во РРР, 2019. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293753/4293753123.pdf> (дата обращения: 16.11.2021).
6. *Тихомиров Г. И.* Технологии обработки воды на морских судах. Владивосток: Изд-во МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2013. 159 с.
7. *Walstra P.* Physical Chemistry of Foods. N. Y.: Marcel Dekker, 2003. 807 p.
8. *Giermanska J., Thivilliers F., Backov R., Schmitt V., Drelon N., Leal-Calderon F.* Gelling of oil-in-water emulsions comprising crystallized droplets // *Langmuir.* 2007. N. 23. P. 4792–4799.
9. *Зубрилов С. П.* Охрана окружающей среды при эксплуатации судов. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
10. *Сепараторы PureBilge / Alfa Laval.* URL: <https://www.alfalaval.ru/products/separation/centrifugal-separators/separators/purebilge> (дата обращения: 06.12.2021).
11. *Сазонов Д. В.* Совершенствование береговых систем очистки судовых нефтесодержащих вод: дис. ... канд. тех. наук. М., 2021. 133 с.

12. *Ксенофонтов Б. С.* Флотационная обработка воды, отходов и почвы. М.: Новые технологии, 2010. 272 с.
13. *Rubio J.* Overview of flotation as a wastewater treatment technique // *Minerals Engineering.* 2002. N. 15. P. 139–155.
14. *Стахов Е. А.* Очистка нефтесодержащих сточных вод предприятий хранения и транспорта нефтепродуктов. Л.: Недра, 1983. 263 с.
15. *Карастелев Б. Я.* Комплекс технологий термического обезвреживания судовых сточных и нефтесодержащих вод: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Владивосток, 2000. 38 с.
16. *Тимонин А. С.* Инженерно-экологический справочник. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. Т. 2. 884 с.
17. *Авторское свидетельство 729416 СССР, М.Кл.2. F23G 7/04.* Способ огневого обезвреживания сточных вод / Полянцева В. Е., Бернадинаер М. Н., Шурьгин А. П., Лепехин И. А. № 25411670/29-33; заявл. 01.11.1977; опубл. 05.05.1980, Бюл. № 15.
18. *Чичурин А. Г., Шураев О. П.* Утилизация нефтесодержащих вод теплотой отработавших газов судовых дизелей // *Вестн. Волж. гос. акад. вод. трансп.* 2016. № 47. С. 201–206.
19. *Пат.* 151927 Рос. Федерация, МПК F01N 3/029. Дизельная установка / Чичурин А. Г., Шураев О. П., Садеков М. Х., Власов В. Н. № 2014121199/06; заявл. 26.05.2014; опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11.
20. *Пат.* 138869 Рос. Федерация, МПК F22B 33/00. Котельная установка / Чичурин А. Г., Садеков М. Х. № 2013136000/06; заявл. 30.07.2013; опубл. 27.03.2014, Бюл. № 9.
21. *Пат.* 148625 Рос. Федерация, МПК F22B 33/00. Котельная установка / Чичурин А. Г., Шураев О. П., Садеков М. Х., Борисов Н. Н. № 2014127763/06; заявл. 08.07.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.

References

1. *Istomin V. I.* Kompleksnaya ochistka sudovykh neftesoderzhashchikh vod [Integrated cleaning of ship oil-containing waters]. Sevastopol', Izd-vo SevNTU, 2004. 202 p.
2. *Reshniak V. I.* Osnovy ochistki i utilizatsii neftesoderzhashchei vody v sudovykh energeticheskikh ustanovkakh:

1. *avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Fundamentals of purification and utilization of oily water in ship power plants: Diss. Abstr. ... Dr. Tech. Sci.]. Saint-Petersburg, 1997. 47 p.
3. *Istomin V. I.* Razrabotka i analiz ekologicheskoi modeli sudovoi energeticheskoi ustanovki i metodika

rascheta optimal'noi proizvoditel'nosti sistem ochistki neftesoderzhashchikh vod [Development and analysis of ecological model of ship power plant and method for calculating optimal performance of oil-containing water treatment systems]. *Morskoe intellektual'nye tekhnologii*, 2020, no. 1-1 (47), pp. 72-78.

4. *Mezhdunarodnaia konventsia po predotvrashcheniiu zagriazneniia s sudov 1973, izmenennaia protokolom k nei 1978 g. (MARPOL 73/78)* [International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as amended by its protocol of 1978 (MARPOL 73/78)]. Moscow, TsNIIMF Publ., 2012. 762 p.

5. *Pravila predotvrashcheniia zagriazneniia okruzhaiushchei srede s sudov* [Rules for the Prevention of Environmental Pollution from Ships]. Rossiiskii rechnoi registr. Moscow, Izd-vo RRR, 2019. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293753/4293753123.pdf> (accessed: 16.11.2021).

6. Tikhomirov G. I. *Tekhnologii obrabotki vody na morskikh sudakh* [Technology of water treatment on sea vessels]. Vladivostok, Izd-vo MGU im. adm. G. I. Nevel'skogo, 2013. 159 p.

7. Walstra P. *Physical Chemistry of Foods*. New York, Marcel Dekker Publ., 2003. 807 p.

8. Giermanska J., Thivilliers F., Backov R., Schmitt V., Drelon N., Leal-Calderon F. Gelling of oil-in-water emulsions comprising crystallized droplets. *Langmuir*, 2007, no. 23, pp. 4792-4799.

9. Zubrilov S. P. *Okhrana okruzhaiushchei srede pri ekspluatatsii sudov* [Environmental protection during ship operation]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1989. 256 p.

10. *Separatory PureBilge*. Alfa Laval [Separators PureBilge. Alfa Laval]. Available at: <https://www.alfalaval.ru/products/separation/centrifugal-separators/separators/purebilge> (accessed: 06.12.2021).

11. Sazonov D. V. *Sovershenstvovanie beregovykh sistem ochistki sudovykh neftesoderzhashchikh vod: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improvement of coastal systems for cleaning ship oil-containing waters: Diss. ... Cand. Tech. Sci.]. Moscow, 2021. 133 p.

12. Ksenofontov B. S. *Flotatsionnaia obrabotka vody, otkhodov i pochvy* [Flotation treatment of water, waste and soil]. Moscow, Novye tekhnologii Publ., 2010. 272 p.

13. Rubio J. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Minerals Engineering*, 2002, no. 15, pp. 139-155.

14. Stakhov E. A. *Ochistka neftesoderzhashchikh stochnykh vod predpriatii khraneniia i transporta nefteproduktov* [Purification of oily wastewater from enterprises of storage and transportation of petroleum products]. Leningrad, Nedra Publ., 1983. 263 p.

15. Karastelev B. Ia. *Kompleks tekhnologii termicheskogo obezvrezhivaniia sudovykh stochnykh i neftesoderzhashchikh vod: avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Complex of technologies for thermal treatment of ship waste and oil-containing waters: Diss. Abstr. ... Dr. Tech. Sci.]. Vladivostok, 2000. 38 p.

16. Timonin A. S. *Inzhenerno-ekologicheskii spravochnik* [Engineering and environmental reference book]. Kaluga, Izd-vo N. Bochkarevoi, 2003. Vol. 2. 884 p.

17. Poliantsev V. E., Bernadiner M. N., Shurygin A. P., Lepakhin I. A. *Sposob ognеvogo obezvrezhivaniia stochnykh vod* [Method of fire treatment of wastewater]. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR, no. 25411670/29-33; 05.05.1980.

18. Chichurin A. G., Shuraev O. P. Utilizatsiia neftesoderzhashchikh vod teplotoi otrabotavshikh gazov sudovykh dizelei [Utilization of oil-containing waters by heat of exhaust gases of marine diesel engines]. *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta*, 2016, no. 47, pp. 201-206.

19. Chichurin A. G., Shuraev O. P., Sadekov M. Kh., Vlasov V. N. *Dizel'naia ustanovka* [Diesel]. Patent RF, no. 2014121199/06; 20.04.2015.

20. Chichurin A. G., Sadekov M. Kh. *Kotel'naia ustanovka* [Boiler]. Patent RF, no. 2013136000/06; 27.03.2014.

21. Chichurin A. G., Shuraev O. P., Sadekov M. Kh., Borisov N. N. *Kotel'naia ustanovka* [Boiler]. Patent RF, no. 2014127763/06; 10.12.2014.

Статья поступила в редакцию 27.12.2021; одобрена после рецензирования 07.07.2022; принята к публикации 12.08.2022
The article was submitted 27.12.2021; approved after reviewing 07.07.2022; accepted for publication 12.08.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Александрович Чернов — аспирант кафедры эксплуатации судовых энергетических установок; Волжский государственный университет водного транспорта; vov7777@bk.ru

Vladimir A. Chernov — Postgraduate Student of the Department of Operation of Ship Power Plants; Volga State University of Water Transport; vov7777@bk.ru

Денис Игоревич Бевза – аспирант кафедры эксплуатации судовых энергетических установок; Волжский государственный университет водного транспорта; Bvz.denis@yandex.ru

Олег Петрович Шураев – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры эксплуатации судовых энергетических установок; Волжский государственный университет водного транспорта; solwrk@inbox.ru

Александр Геннадьевич Чичурин – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры эксплуатации судовых энергетических установок; Волжский государственный университет водного транспорта; alex1.chich@yandex.ru

Denis I. Bevza – Postgraduate Student of the Department of Operation of Ship Power Plants; Volga State University of Water Transport; Bvz.denis@yandex.ru

Oleg P. Shurayev – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Operation of Ship Power Plants; Volga State University of Water Transport; solwrk@inbox.ru

Alexander G. Chichurin – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Operation of Ship Power Plants; Volga State University of Water Transport; alex1.chich@yandex.ru

