

- Misnar A. Teploprovodnost' tverdyhtel, zhidkosteij, gazoviihkompozicij [Thermal conductivity of solids, liquids, gases and their compositions]. M.: Mir, 1968, 464 p.
2. Vargaftik N.B., Zimina N.H. Teploprovodnost' vodyanogo para privysokih temperaturah [Thermal conductivity of water vapor at high temperatures]. Teploenergetika, 1964, no. 12, pp. 84–86.
3. Dul'nev G.M., Zarichnyak Yu.P. Teploprovodnost' smesej i kompozicionnykh materialov [Thermal conductivity of mixtures and composite materials]. L.: Energiya, 1974, 264 p.
4. Abdullaev K.M., El'darov V.S. Raschet teploprovodnost' dvuhkomponentnykh vodnykh rastvorov solej [Calculation of the thermal conductivity of two-component aqueous solutions of salts]. Izvestiya vuzov: Neft' i gaz, 1985, no. 10, pp. 57–60.
5. Chernen'kaya E.I., Vernigora G.A. Eksperimental'noe i raschetnoe opredelenie teploprovodnost' rastvorov proizvodstva ammiachnojsody [Experimental and calculated determination of the thermal conductivity of solutions for the production of ammonia soda]. Zhurn. prikladnoj khimii, 1973, no. 6, pp. 12–24.
6. Zajcev I.D., Cejtin N.A. Metody raschet parametrov fiziko-himicheskikh svoystv smeshannykh rastvorov elektrolitov [Methods for calculating the parameters of the physicochemical properties of mixed electrolyte solutions]. Zhurn. prikladnoj khimii, 1977, no. 3, pp. 33–35.
7. Rastorguev Yu.L., Ganiev Yu.A. Teploprovodnost' zhidkih rastvorov [Thermal conductivity of liquid solutions]. IFZh, 1968, T. 14, pp. 689 – 697.
8. Kosolap Yu.G. Teploprovodnost' binarnykh i smeshannykh rastvorov elektrolitov [Thermal conductivity of binary and mixed solutions of electrolytes]: dis. kand. tekhn. nauk. – Baku, 1990.
9. Karakaev A.B. Osnovnye principy modelirovaniya i informacionnoj podderzhki processov upravleniya ekspluatatsiej sudovykh elektroenergeticheskikh sistem. (CHast' 1 [Tekst] / A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert // Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2017. № 2 (83). S. 114–122.
11. Astrein V.V., Kondrat'ev S.I., Boran-Keshish'yan A.L. Zadacha samoorganizacii grupp sudov dlya preduprezhdeniya stolknovenij / Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2016. № 1 (78). S. 32–38.
12. Studenikin D.E. Estimation of vessel's movement with the aid of fuzzy logic based hierarchy systems (in english) [tekst] / D.E. Studenikin, E.V. Khekert, M.A. Modina // Morskoe intellektual'nye tekhnologii. 2018. T. 1. № 1 (39). S. 205–208.

УДК 621.431.74

DOI: 10.34046/aumsuomt94/26

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТЯЖЁЛОГО ТОПЛИВА И ВОДОТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ДЛЯ ГЛАВНЫХ СУДОВЫХ ДВУХТАКТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

А.К. Полковников, кандидат технических наук, доцент

Н.А. Полковникова, кандидат технических наук

В статье рассмотрены особенности гидродинамической обработки высоковязкого тяжёлого топлива RMG380 (500) с помощью четырёхкамерного гомогенизатора. Мелкодисперсная и однородная смесь топлива и воды образуется в результате резкого изменения скорости истечения в соплах и падения давления в вакуумной камере, а смешивание происходит за счёт прохода эмульсии через отверстия на выходе из камеры ультразвуковых колебаний. Разработана схема модернизации судовой расходной топливной системы для приготовления и использования водотопливных эмульсий (ВТЭ) в главных двухтактных дизелях. Применение четырёхкамерного гомогенизатора обеспечивает измельчение структуры органической части топлива, уменьшению размеров агломератов смол и асфальтенов, в результате увеличивается скорость сгорания в цилиндрах. Представлены результаты эксплуатационных испытаний главного судового двигателя при использовании ВТЭ на основе тяжёлого топлива RMG380. Использование ВТЭ с содержанием воды 12 % позволяет снизить расход топлива за счёт улучшения качества смесеобразования, способствует уменьшению нагарообразования и замедлению реакций окисления азота. Рассмотрены физические причины положительного влияния ВТЭ на экономические и экологические показатели дизеля.

Ключевые слова: судовой дизель, судовой гомогенизатор топлива, тяжёлое топливо, водотопливная эмульсия, отработавшие газы, выбросы вредных веществ с отработавшими газами, структура эмульсии, содержание воды.

The paper considers features of high viscosity heavy fuel RMG380 (500) hydrodynamic treatment using a four-chamber homogenizer. A finely dispersed and homogeneous mixture of fuel and water is formed as a result of sudden change in nozzles outflow velocity and a pressure drop in vacuum chamber, and mixing occurs due to the passage of emulsion through the holes at ultrasonic vibrations chamber outlet. Modernization scheme of the marine fuel supply system for preparing and using water-fuel emulsions in two-stroke marine diesel engines has been developed. The use of a four-chamber homogenizer ensures grinding structure of fuel organic part, size reduction of resins agglomerates and asphaltenes, as a result, the combustion rate in cylin-

ders increases. The results of operational tests of the main marine engine using water-fuel emulsions based on heavy fuel RMG380 are presented. The use of water-fuel emulsions with a water content of 12% allows to reduce fuel consumption by improving the quality of mixture formation, reduce carbon formation and slow down the nitrogen oxidation. Considered physical reasons for positive influence of water-fuel emulsions on the economic and environmental indicators of diesel engine.

Key words: marine diesel engine, marine fuel homogenizer, heavy fuel oil, water-fuel emulsion, exhaust gas, exhaust gas harmful emissions, emulsion structure, water content.

Повышение эффективности технической эксплуатации судовых дизельных установок – проблема комплексная, одной из важнейших задач которой является улучшение топливоиспользования. В последние годы повышение энергетической и экономической эффективности дизелей достигалось за счёт повышения степени форсировки, интенсификации параметров рабочего процесса, конструктивных и технологических решений, позволяющих использовать более дешёвое тяжёлое топливо, получаемое из остаточных фракций нефтепереработки. Однако при этом увеличивались максимальные давление и температура в цилиндре и, соответственно, эмиссия оксидов азота (NO_x). Установлено, что образование оксидов азота в цилиндрах дизельного двигателя определяется условиями в камере сгорания: высокое давление при температуре более 1500°C . Изменения температуры в камере сгорания на 100°C может изменить количество образующихся оксидов азота в три раза. Для снижения содержания в отработавших газах окислов углерода CO_x , углеводородов C_xH_y , сажи C , наоборот необходимо повысить температуру сгорания.

Проблема снижения эмиссии токсичных составляющих в отработавших газах судовых дизелей приобрела особую актуальность с введением Технического Кодекса Приложения VI Материалов Международной Конвенции МАРПОЛ, в соответствии с которым для морских судов нормируются выбросы оксидов азота, летучих оксидов серы и озоноразрушающих веществ, а также охватывает вопрос энергоэффективности. В установленных зонах контроля (Emission Control Areas – ECA) для новых судовых малооборотных дизелей (МОД) выбросы NO_x в выпускных газах ограничиваются значением $3,4 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$. Поэтому проблема снижения выбросов NO_x становится весьма актуальной как для дизельстроительных фирм, так и для судовладельцев.

Комитет по защите окружающей среды ИМО постановил, что с 1 января 2020 г. содержание серы в судовом топливе не должно превышать $0,5\%$ для всего Мирового океана (сегодня $3,5\%$). Наиболее жесткие требования разработаны для районов контроля вредных выбросов SECA (SO_x Emission Control Areas). При заходе

судов в зоны SECA содержание SO_x в отработавших газах не должно превышать $0,4 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$, что обеспечивается, если содержание серы в судовом дистиллятном топливе не более $0,1\%$.

В настоящее время возможность сокращения эмиссии токсичных составляющих в отработавших газах судовых дизелей за счёт совершенства характеристик рабочего процесса практически исчерпана [1] – [5].

Кардинальная очистка отработавших газов с помощью скрубберов устанавливаемых на выпускном газопроводе дизелей широкого применения не находит из-за большой стоимости. Так для танкера типа «Афрамекс» инвестиции должны составить 6-8 млн долларов с установкой скруббера, а также ещё затраты на техническое обслуживание и ремонт.

Помимо ограничений, связанных с оксидами серы и азота на повестке дня в судоходной отрасли стоит снижение выбросов парниковых газов (CO_2). Международной морской организацией ИМО принята комплексная стратегия по снижению выбросов парниковых газов с судов на основе сбора данных по количеству используемого топлива. Принята обязательная глобальная система сбора данных по расходу топлива судами. Судам устанавливается определённый «Индекс энергетической эффективности проекта судна» (EEDI – Energy Efficiency Design Index) и соответствующий эксплуатационный индекс (EEOI). Индексы EEDI и EEOI являются не столько показателями энергетической эффективности судна, сколько показателями массы генерации парникового газа. Также ужесточаются требования на ограничение выбросов твёрдых частиц. Новые экологические ограничения не просто формулируют новые вызовы для судоходства, но и вынуждают судовладельцев к поиску наиболее эффективных и безопасных технических решений для снижения индексов EEDI и EEOI.

Практика показывает, что модернизация судов под каждую из новых экологических норм по отдельности требует применения большого количества нового оборудования и внедрения сразу нескольких достаточно сложных и дорогостоящих технологий. Более эффективным реше-

нием выглядит переход на альтернативный вид топлива, который сразу позволит сократить все виды выбросов, удовлетворив тем самым все вновь вводимые нормативные ограничения.

В 80-ых годах прошлого века разрабатывались и эффективно применялись технологии, позволяющие воздействовать на физико-химические свойства топлив. Для этого в топливо вводятся присадки, интенсифицирующие процесс сгорания и уменьшающие эмиссию токсичных составляющих в окружающую среду, осуществляется перевод двигателей на водотопливную эмульсию, перед подачей в двигатель топливо гомогенизируется, обрабатывается высокочастотными ультразвуковыми колебаниями, сопровождаемыми кавитационными явлениями. Интенсивные исследования в данном направлении повышения эффективности использования топлива в судовых дизелях на протяжении многих лет велись многими научно-исследовательскими организациями.

Однако в этой области имеется ряд важных малоизученных проблем. Прежде всего, необходимо отметить отсутствие исследований по определению области рационального применения водотопливных эмульсий (ВТЭ). В большинстве случаев перевод дизелей на ВТЭ сопровождается уменьшением расхода топлива, иногда такого эффекта не наблюдается, а в некоторых опытах расход топлива даже несколько возрастает. Такая неопределенность вызывает у двигателестроителей и эксплуатационников некоторое недоверие к ВТЭ и существенно мешает её широкому практическому использованию.

В настоящее время для судовых дизелей основными являются тяжелые остаточные топлива, вязкость которых достигает 500 сСт. И эта величина постепенно поднимается в связи с более глубокой переработкой нефти, что приводит к снижению показателей качества и увеличению содержания примесей. Это является причиной нарушения не только гидродинамических, но и тепловых процессов, происходящих в теплообменных аппаратах топливной системы, к повышенной коксуемости топлива, к снижению качества его распыливания, ухудшению функционирования топливной аппаратуры дизеля, к снижению качества процесса горения топлива. Это в конечном итоге приводит к снижению экономичности, надежности, ухудшению экологической чистоты, к уменьшению межремонтного цикла дизеля в целом. Тяжёлое высоковязкое топливо марок RMG380 и RMG500 (ISO 8217-2017) применяемое для судовых дизелей – это

крекинг-топливо с высоким содержанием асфальтосмолистых составляющих, которые в больших количествах уходят в шлам при сепарации.

Поэтому на наш взгляд следует возобновить испытания использования водотопливных эмульсий на основе тяжёлого топлива марок RMG380 и RMG500 в главных двухтактных крейцкопфных малооборотных дизелях. Целесообразность применения ВТЭ для снижения вредных выбросов и необходимость проведения дополнительных исследований в этой области отмечалась в выступлениях докладчиков на Международном конгрессе СИМАС-2016.

Уменьшение содержания оксидов азота в отработавших газах судовых дизелей является весьма сложной задачей, так как это связано с ограничениями максимальной температуры цикла и индикаторного коэффициента полезного действия, но при этом ограничивается топливная экономичность. Рентабельность судов зависит от оптимизации использования топлива, поэтому для улучшения экологических показателей дизелей находящихся в эксплуатации альтернативным решением является применение ВТЭ [6] – [11].

Более полное сгорание тяжёлого топлива и избежать образование сажи и дымления на выхлопе может быть достигнуто путём улучшения воздухообмена, смесеобразования и снижения температур в камере сгорания в целях исключения локальных зон с температурами выше 2000 К. Дело в том, что в этих зонах происходит не только интенсивное окисление азота с образованием NO_x , но и крекинг углеводородов топлива с образованием свободного углерода (сажи), который при недостатке воздуха не сгорает и создаёт дым на выхлопе.

Представляет интерес опыт, накопленный в Новороссийском морском пароходстве (НМП) в 80-ых годах, когда на суда стали поступать крекинг-топлива с высоким содержанием асфальтосмолистых составляющих, которые в больших количествах уходили в шлам сепарации. Системы тяжёлого топлива с вязкостью 380 сСт при 50 °С и плотностью до 0,95 г/см³ для судовых дизелей, оборудованные центробежными сепараторами, обеспечивают качественную подготовку, однако при плотности сепарируемого топлива 0,985 г/см³ очистка становится критической в части отделения воды и механических примесей. Смолы, асфальтены, карбены, карбоиды, механические примеси неорганического происхождения и вода образуют сложные соеди-

нения, из-за которых затрудняется очистка в фильтрах и сепараторах.

Применение тяжёлых сортов топлива в судовых дизелях привело к возникновению проблем, связанных с топливоподготовкой, повышенным износом деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ), образованием нагаров и отложений, увеличением потерь топлив с отходами сепарации. Эти топлива представляют собой сложные неоднородные коллоидные системы с большим содержанием смолисто-асфальтеновых веществ и механических примесей, которые не только увеличивают абразивную активность и нагарообразование, но и выпадают в осадок при хранении топлива и его подогреве. Использование традиционных способов подготовки этих топлив (сепарирование и фильтрация) приводит к значительной потере горючей высокомолекулярной части. Это в свою очередь повышает расход топлива и создаёт проблему использования отходов сепарации, которые содержат смолисто-асфальтеновые вещества, являющиеся горючей частью топлива. Чтобы уменьшить потери горючей массы со шламом, была использована обработка топлива в гомогенизаторе для измельчения структуры органической части топлива, уменьшению размеров агломератов смол и асфальтенов до 3...5 мкм. Но при этом дробятся также различные минеральные примеси и капли воды. Вода с топливом переходят в состояние ВТЭ, состоящей из микрокапель воды, окружённых оболочкой из тяжёлых составляющих топлива.

Всё это обусловило применение гомогенизации – метода, при котором повышается дисперсность (размельчение) смолисто-асфальтеновых веществ, увеличивается равномерность их распределения по объёму. Гомогенизатор представляет собой устройство, применяемое для получения однородной физически стабильной смеси, в котором топливо подвергается действию гидродинамического давления, усилиям сдвига и истирания, что обеспечивает измельчение частиц до необходимого размера. Разрыву частиц способствуют также резкие изменения ускорений, сопровождаемые высокочастотными волнами скоростей и давлений, использование для гомогенизации ультразвука, центробежных сил или адиабатного вскипания в вакууме.

Эмульсией называется дисперсная система, состоящая из двух не растворяющихся друг в друге жидкостей, одна из которых (дисперсная фаза) распределена в виде мелких частиц в другой (дисперсионной среде). Обычно в названии эмульсии сначала указывается дисперсная фаза,

а затем дисперсионная среда. Так, смесь, состоящая из водной дисперсной и топливной дисперсионной фаз, называется водотопливной эмульсией. К важнейшим физико-химическим свойствам любого топлива относятся плотность, вязкость, поверхностное натяжение, температура вспышки, температура застывания, коррозионная активность, а для эмульгированных топлив – устойчивость. Все эти свойства являются необходимыми для организации качественной эксплуатации дизельных двигателей, для хранения и транспортировки горючего, а также при расчёте и анализе процессов распыливания, смесеобразования и сгорания топлива. Качество ВТЭ определяется тремя характеристиками: массовой долей воды (%), дисперсностью (средним размером частиц) и равномерностью распределения (по дисперсной среде) водной фазы. При определении физико-химических свойств эмульсии величина массовой доли воды (%) является независимым параметром. Особого внимания заслуживает влияние тонкости диспергирования водной фазы на основные свойства эмульсий. Важным показателем ВТЭ является устойчивость, так как во многом определяет надёжность работы двигателя на этом топливе. Устойчивость эмульсий – это способность сохранять со временем дисперсность (агрегативную устойчивость) и равномерность распределения (кинетическую устойчивость) водной фазы. Данное свойство существенно влияет на выбор способа приготовления эмульсии и устройство топливной системы в целом [12] – [15].

В НМП (впоследствии ОАО «Новошип») было принято решение по повышению экономичности судовых дизельных установок путём использования ВТЭ. Гомогенизаторы были установлены для обеспечения работы на ВТЭ главных двигателей 7ДКРН80/160-4 (танкер «Маршал Василевский»), 6ДКРН 67/140-4 («Борис Ливанов» и «Сергей Лемешев»).

Как известно, содержание воды в топливе нежелательно и строго нормируется стандартами на топливо. Однако использование в дизелях специально подготовленной эмульсии даёт определённый эффект. После впрыска в цилиндр глобулы эмульсии прогреваются и, поскольку вода испаряется раньше топлива, давление внутри глобулы растёт и происходит микровзрыв (вода, равномерно распределённая по топливу в виде мельчайших капель, испаряется быстрее топлива вследствие более низкой температуры кипения). Топливная оболочка рвётся на мелкие части и это способствует более быстрому её испарению и лучшему перемешиванию с воздухом. Все эти

факторы в совокупности улучшают процесс горения, повышают динамику тепловыделения и снижают удельный расход топлива. При использовании ВТЭ температура в камере сгорания понижается и это способствует уменьшению образования твёрдых углистых частиц сажи и замедлению реакций окисления азота.

Для использования гомогенизации и приготовления топливных смесей и ВТЭ штатная топливная система главного двигателя (ГД) была дооборудована. На рис. 1 представлена принципиальная схема расходной топливной системы, в состав которой входит следующее оборудование: 1, 2 и 3 – расходные и отстойная цистерны; 4 – трёхходовой клапан; 5 – смесительная ци-

стерна; 6 – расходомер для топлива марки КЦЖУ-40-6С; 7 – топливоподкачивающие шестерёнчатые насосы марки ШФ8-25-5,8/6Б; 8 – фильтр тонкой очистки; 9 – штатный топливный подогреватель марки ПМ-6,5Г; 10 – вискозиметр; 11 – дополнительный топливный подогреватель марки ПМ-6,5Г; 12 – шестерёнчатый топливный насос марки ЗВ8-25-11/10Б-3 с паспортной подачей 12,5 м³/ч при давлении 10 бар (мощность электродвигателя 7,5 кВт); 13 – водомер марки ВКСМ 32/10, обеспечивающий контроль расхода воды до 500 л/ч; 14 – клапан для регулировки подачи пресной воды; 15, 17 – топливные фильтры грубой очистки; 16 – два гомогенизатора производительностью до 5 м³/ч каждый.

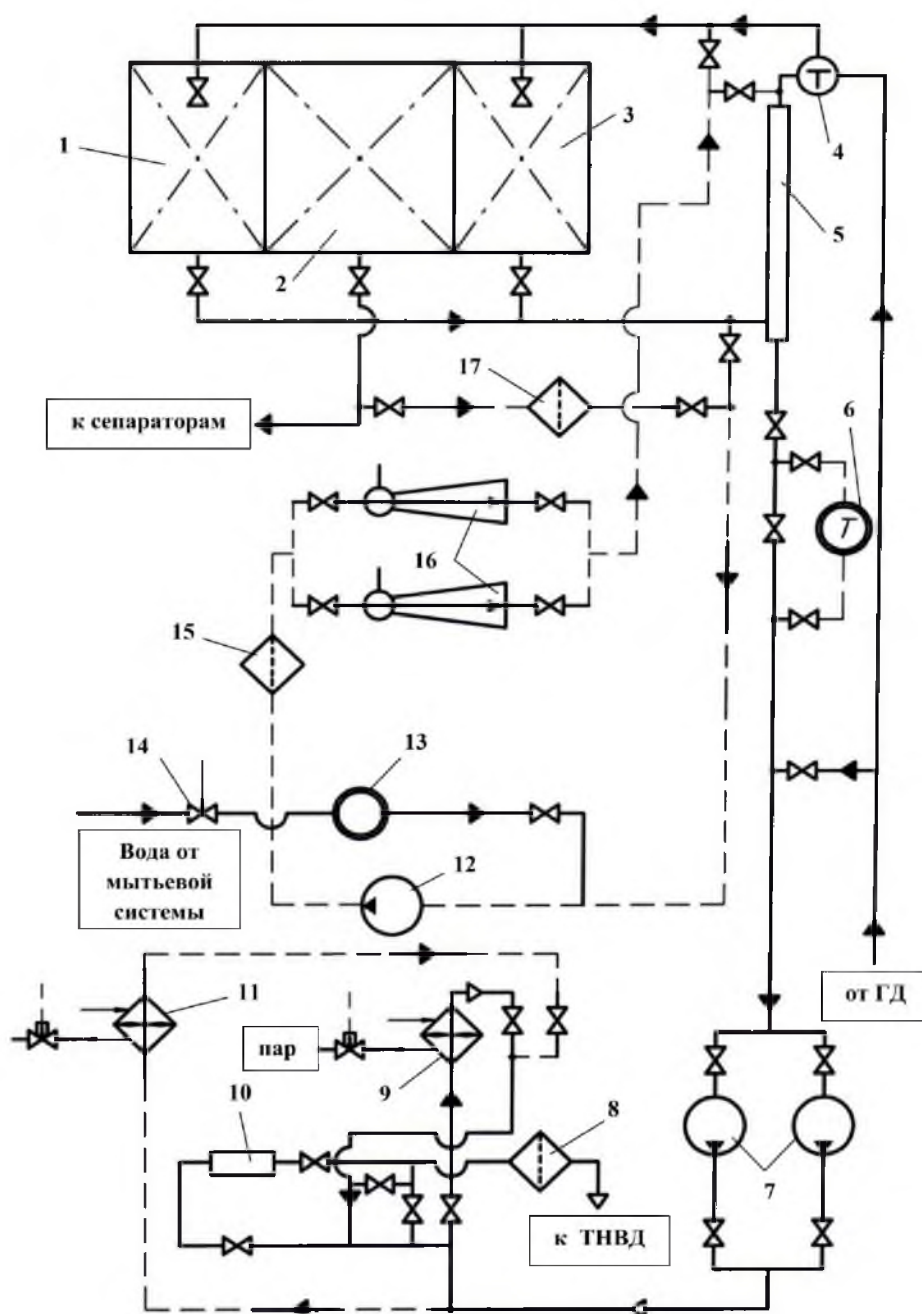


Рисунок 1 – Схема топливной системы для приготовления и использования водотопливных эмульсий штатная, доработанная для использования ВТЭ

Отличительной особенностью разработанной схемы является то, что водо-топливная эмульсия готовится в смесительной цистерне 5 перед непосредственной подачей к топливным насосам высокого давления (ТНВД), а не в расходной цистерне, где требовалась бы постоянная гомогенизация для предотвращения расслаивания эмульсии и обеспечения стабильности смеси. В связи с тем, что требовался более высокий подогрев эмульсии перед ТНВД, так как вязкость её выше вязкости топлива, был установлен дополнительный топливный подогреватель 11.

При использовании ВТЭ производится постоянный процесс гидродинамической обработки топлива, а для прекращения приготовления эмульсии достаточно закрыть клапан 14 на трубопроводе подачи воды.

На рис. 2 и 3 представлены схема и фото четырёхкамерного гомогенизатора [16]. Гомогенизатор состоит из четырёх последовательно включённых камер (по ходу движения топлива): 2 – вакуумной камеры, 3 – камеры ультразвуковых колебаний, 4 – камеры смешивания и 5 – камеры завихрения. Фланец 1 является входным по ходу движения топлива в гомогенизаторе. Из

камеры завихрения с выходного фланца 6 гомогенизатора через обратный трубопровод с краном 7 можно возвращать 40...50% гомогенной смеси для повторной дополнительной обработки. Кран 7 представляет собой байпасный клапан, 8 – пластина с отбойником, 9 и 10 – фланцы.

Вакуумная камера 2 состоит из 17 эжекторных элементов, расположенных concentрично по окружности соплового фланца. Каждый эжекторный элемент имеет диаметр сопловых отверстий 1,7 мм, минимальный диаметр отверстия конфузора 2,5 мм. Разрежение в камере регулируется изменением толщины прокладки между входным фланцем вакуумной камеры 9 и фланцем 10. Мелкодисперсная и гомогенная смесь топлива и воды образуется в результате резкого изменения скорости истечения в соплах и падения давления в камере.

В камере 3 ультразвуковых колебаний установлено 17 резонансных пластин (2×9×128) с отбойниками, расположенными напротив сопел. Поток ВТЭ, выходящий из конфузора вакуумной камеры, попадает на отбойники пластин 8.

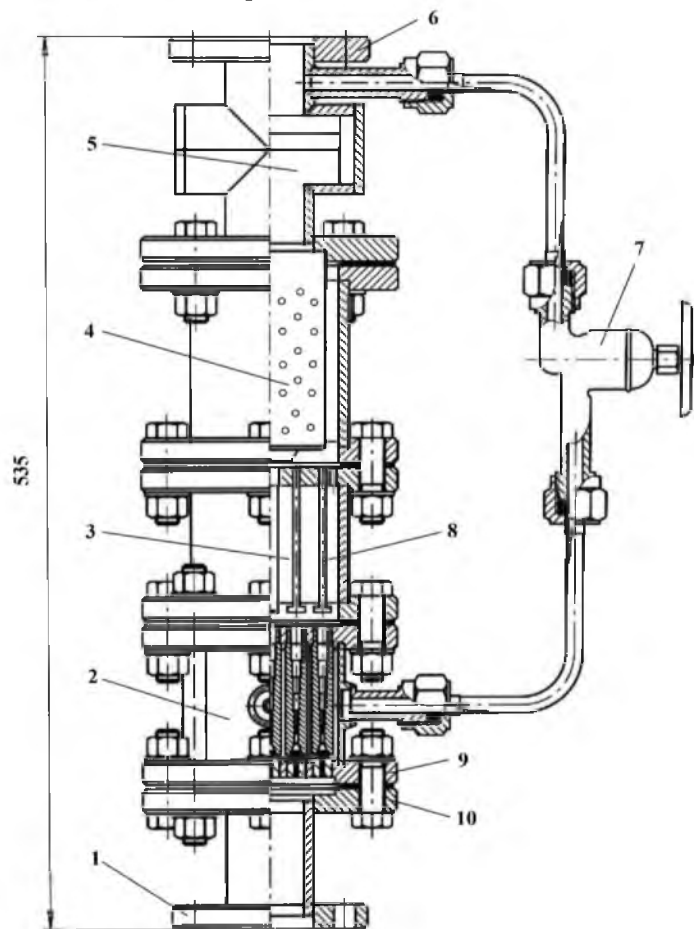


Рисунок 2 – Схема четырёхкамерного гомогенизатора для приготовления ВТЭ:

1 – входной фланец, 2 – вакуумная камера, 3 – камера ультразвуковых колебаний, 4 – камера смешивания, 5 – камера завихрения, 6 – выходной фланец, 7 – байпасный клапан, 8 – пластина с отбойником, 9 и 10 – фланцы



Рисунок 3 – Фото четырёхкамерного гомогенизатора

При дроблении и перемешивании воды с топливом используется эффект гидравлического удара о преграду – отбойники. В результате вибрации пластин 8 в топливной среде образуются зоны с разрежением, что вызывает образование пузырьковых пустот, и зоны с повышенным давлением, из-за которых происходит «захлопывание» пузырьковых пустот. Таким образом, с помощью пластинчатых вибраторов 8 создаются условия для возникновения кавитационных явлений, которые сопровождаются локальными гидравлическими ударами в объёме камеры 3. Эмульгирование смеси происходит за счёт воздействия на смесь ультразвуковой энергии колебаний пластин, колеблющихся за счёт энергии движущейся струи жидкости.

Камера смешивания 4 выполнена из стального стакана диаметром 76 мм, по винтовой линии которого расположено 41 отверстие диаметром по 1,7 мм каждое с различными углами наклона к поверхности стакана. Эффект смешивания достигается за счёт сложного пути движения ВТЭ и дросселирования при проходе топлива через отверстия.

В камере завихрения 5 расположены пластины лепесткового типа. Эффект гомогенизации достигается в результате кавитации, возникающей в топливе под влиянием ультразвуковых колебаний, а эффект смешивания – за счёт прохода топлива через отверстия на выходе из камеры ультразвуковых колебаний. В результате вибрации в топливной среде образуются местные разрежения, что вызывает образование очаговых пустот. Следующее вслед за разрежением локальное повышение давления вызывает «захлопывание» этих пустот, сопровождающееся локальным гидравлическим ударом. Технология кавитации позволяет обеспечить взаимное перемешивание несмешивающихся жидкостей, и получить высокостойкие высокодисперсные, не расслаивающиеся в течение длительного време-

ни топливные смеси.

Гомогенизатор данной конструкции выполнен для подачи до 5 м³/ч ВТЭ при давлении до 15 бар. При необходимости увеличения пропускной способности гомогенизатора диаметр сопловых отверстий вакуумной камеры и камеры смешивания могут быть соответственно увеличены. В зависимости от назначения гомогенизатора число камер может быть уменьшено, но при этом соответственно снизится диспергирующая способность гомогенизатора.

Для получения в смесительной цистерне 5 однородной мелкодисперсной ВТЭ необходимо, чтобы работал один или оба гомогенизатора одновременно (параллельная работа), что зависит от качества используемого топлива и процентного содержания воды в ВТЭ (рис. 1). Из расходной цистерны топливо подаётся насосом 12 через фильтр 15 и гомогенизаторы 16 в смесительную цистерну 5. Для приготовления и использования ВТЭ открывают клапан 14 на водяном трубопроводе. В результате пресная вода с температурой 40...60 °С и давлением 0,25...0,30 МПа вместе с топливом подаётся насосом 12 на гомогенизаторы, где и образуется ВТЭ. Контроль процентного содержания воды осуществляется расходомером 13, а клапаном 14 регулируют подачу пресной воды. Перевод работы главного судового дизеля на ВТЭ производится на установившемся режиме и включает следующие процедуры:

- установить трёхходовой клапан 4 в штатное положение, при котором отсечное топливо от дизеля поступает в смеситель 5 (рис. 1);
- установить запорную арматуру на системе гомогенизации так, чтобы ВТЭ поступала в смесительную цистерну 5 и запустить насос 12;
- расход топлива контролировать расходомером 6, а клапаном 14 отрегулировать нужный массовый расход пресной воды для приготовления ВТЭ.

При работе ГД на ВТЭ необходимо под-

держивать вакуум на гомогенизаторах в пределах 0,5...0,6 бар. Величина вакуума является косвенным показателем качества приготовления ВТЭ (гомогенность, мелкодисперсность и стабильность эмульсии). При падении вакуума необходима разборка гомогенизатора и механическая очистка сопел вакуумной камеры.

В смесительной цистерне 5 обеспечивается многократная гидродинамическая обработка ВТЭ, так как подача насоса 12 в 2...2,5 раза больше расхода на двигатель. Испытания ГД 7ДКРН 80/160-4 производились на двух ре-

жимах винтовой характеристики при использовании тяжёлого топлива марки RME180 (вязкость 180 сСт при 50 °С) и водотопливной эмульсии с содержанием воды 12 %. В табл. 1 представлены параметры работы системы гомогенизации.

В процессе испытаний производился отбор проб ВТЭ после гомогенизатора. Результаты анализа проб ВТЭ, выполненных теплотехнической лабораторией ОАО «Новошип» представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 1 – Номинальные параметры системы гомогенизации

№ шп	Наименование параметра	Размерность	Величина
1	Давление нагнетания насоса гомогенизаторов	МПа	0,9...1
2	Вакуум на гомогенизаторах: – при работе в режиме гидродинамической обработки топлива и приготовления топливных смесей; – при работе в режиме приготовления и использования ВТЭ	МПа	0,05...0,06 0,01...0,02
3	Температура топлива перед гомогенизаторами, не ниже	°С	45
3	Давление воды для приготовления ВТЭ	МПа	0,25...0,35
4	Температура воды для приготовления ВТЭ	МПа	40...50

Таблица 2 – Результаты анализа проб гомогенизированной ВТЭ

Показатели качества	Проба №1	Проба №2
Плотность при 15 °С, кг/м ³	957,8	969,8
Вязкость при 50 °С, сСт	167	225
Содержание воды, %	12	12

Таблица 3 – Результаты микроскопии в просматриваемом поле ВТЭ

Показатели качества	Размеры частиц, мкм				
	10...20	20...30	30...40	40...50	более 50
Проба № 1: – число глобул воды – механические примеси более 2...3 мкм	62	10	1	3	2
Проба № 2: – число глобул воды – механические примеси более 2...3 мкм	68	15	4	5	3

Анализ проб ВТЭ показал, что основная масса глобул воды и частиц механических примесей находится в мелкодисперсном состоянии: большая часть глобул воды имеет размер 5...7 мкм, а размер механических примесей – более 2...3 мкм.

В табл. 4 представлены результаты сравнительных испытаний ГД 7ДКРН 80/160-4 основных параметров рабочего процесса дизеля с замерами расхода топлива и гомогенизированной ВТЭ. Система приготовления и использования ВТЭ отработала 850 часов без затруднений со стороны работы системы топливоподготовки и дизеля.

В начальный период эксплуатации системы приготовления и использования ВТЭ в работе гомогенизатора наблюдалось падение вакуума, но в процессе работы вакуум в гомогенизаторе

стабилизировался и поддерживался в пределах 0,5...0,75 бар. При частоте вращения ГД 102...107 об/мин топливная система и гомогенизаторы работали стабильно, без каких-либо нарушений. За время проведения теплотехнических испытаний ГД при частоте вращения 102...106 об/мин в грузу и балласте было израсходовано 883 тонны приготовленной ВТЭ.

В гомогенизаторе последовательно осуществляется многоступенчатое диспергирование, гомогенизация смешиваемых жидкостей на уровне высокочастотных ультразвуковых колебаний, сопровождаемых интенсивными кавитационными явлениями. Такой способ обработки жидкостей обеспечивает приготовление ВТЭ с размерным рядом частиц водной фазы 1...5 мкм, с дисперсностью частиц топливной среды 3...5 мкм.

Таблица 4 – Результаты замеров параметров работы ГД 7ДКРН 80/160-4 при работе на топливе RME180 и гомогенизированной ВТЭ

Наименование параметра	Значения параметров			
	Режим №1		Режим №2	
Используемое топливо	RME180	ВТЭ (12 % воды)	RME180	ВТЭ (12 % воды)
Частота вращения коленчатого вала n, об/мин	130,7	130,5	135,1	135
Положение указателя нагрузки УН, число делений	6	6,7	6,5	7,2
Средний индекс ТНВД, число делений (ИТН)	75,8	83,4	81	88
Средняя температура выпускных газов по цилиндрам, °С	344	334	370	361
Среднее индикаторное давление (среднее по цилиндрам), бар	8,8	8,74	9,29	9,47
Максимальное давление сгорания (среднее по цилиндрам), бар	69,5	68	71,2	69,7
Расход топлива, л/ч	1192	–	1314	–
Расход ВТЭ, л/ч	–	1314	–	1451
Различия параметров: – увеличение ИТН, числоделений (%); – увеличение расхода топлива, л/ч (%); – снижение средней температуры выпускных газов, °С (%); – увеличение УН, число делений (%)	норма норма норма норма	7,6 (9,11) 122 (9,28) 10 (2,9) 0,7 (10,44)	норма норма норма норма	7 (7,95) 137 (9,44) 9 (2,43) 0,7 (9,72)
Снижение расхода топлива*, л/ч		36		37
м³/сут		0,86		0,88
%		2,72		2,56

* экономия топлива определена путём извлечения из ВТЭ количества введённой воды

Гомогенизатор действует на основе энергии потока взаимодействующих жидкостей, параметры состояния потоков жидкостей трансформируются. В областях потока, где скорость изменения параметров превышает скорость релаксации жидкости, генерируются высокочастотные ультразвуковые колебания, возникают кавитационные явления, воздействующие на физико-химическую структуру топливной среды. Степень воздействия на качественные показатели топлива, в основном, зависит от: плотности энергии несущего потока в областях массообмена; температуры, вязкости, обрабатываемой среды; длительности массообменных процессов; пути и скорости трансформации потока в рабочих органах устройств; площади контакта потока с твердыми поверхностями; насыщения потока парогазовыми пузырьками и от других факторов. Структурный состав топлива в потоке с высокой плотностью энергии изменяется под воздействием массообменных процессов между слоями жидкости, вызванных критическим перепадом градиента скорости, а также ультразвуковых колебаний, сопровождаемых кавитационными явлениями.

Изменения в молекулярном составе топлива, вызванные кавитационно-ультразвуковой обработкой, подтверждены исследованиями методом жидкостной рефрактометрии. Проведённые замеры подтвердили изменение физико-

химических свойств топлива, полученные данные свидетельствовали о полном разрыве длинных молекулярных цепей, об уменьшении молекулярного веса и радиуса молекул. Режим кавитационной обработки топлива на уровне процессов «микрорекинга», «гидроочистки», приготовления высокодисперсной ВТЭ с размерным рядом частиц водной фазы 1...5 мкм обеспечивается подводом энергии от потока топлива штатных топливоподающих насосов. Частицы карбенов, карбонидов, асфальтенов, сгустков смол на выходе из гомогенизатора не превышают размера 3...5 мкм.

Применение эмульгированного топлива качественно изменяет процессы смесеобразования и сгорания в цилиндрах дизелей. Эффективность процесса горения находится в прямой зависимости от степени измельчения и скорости движения частиц топлива в камере сгорания в период формирования предпламенного процесса. Впрыскиваемая через отверстие сопла форсунки струя топлива, встречая сопротивление воздушного заряда, распадается на капли. Степень измельчения топлива в камере сгорания зависит от параметров взаимодействующих систем воздушного заряда и топлива.

Наиболее активно струя топлива распадается на капли в периферийной и фронтальной области. Центральная же зона струи, в которой сосредоточено до 80 % топлива, внешними сло-

ями изолируется от контакта с воздушным зарядом, вследствие этого её прогрев и окисление замедляется. Наиболее интенсивное испарение и смесеобразование происходит в непосредственной близости от сопловых отверстий распылителя форсунки, в этой зоне струи, частицы топлива имеют высокую дисперсность, быстро прогреваются, окисляются, поэтому в данной зоне начинается горение. Средний же размер частиц высоковязкого топлива в камере сгорания находится в пределах размерного ряда 40...80 мкм. Крупные частицы медленнее прогреваются, испаряются, имеют меньшую поверхность контакта с кислородом воздушного заряда, их сгорание замедляется, переходит на линию расширения, что снижает эффективность использования топлива.

Процесс нагревания капель ВТЭ сопровождается скачкообразным изменением их диаметра в 1,5...2 раза, отрывом от основной массы топлива мелких частичек и дроблением исходной капли. Указанные особенности поведения капель являются следствием микровзрывов, происходящих при изменении фазового состояния воды, находящейся в топливе в виде объёмных включений.

Интерес представляет определение температур, при которых вскипает вода в условиях капли водотопливной эмульсии – первого микровзрыва. Второй и последующие микровзрывы происходят при условиях, отличных от первого, так как капля ВТЭ находится в сильном возмущении после первого микровзрыва и перегрев воды в ней невозможен. Она находится под действием внутреннего давления водяного пара и внешнего давления среды. Под давлением паров воды в топливной оболочке возникают напряжения растяжения. От разрыва топливную оболочку удерживают силы поверхностного натяжения топлива, создающие на поверхности капли напряжения сжатия. По мере прогрева капли ВТЭ давление водяных паров будет расти, увеличивая растягивающие напряжения в топливной оболочке. Капля будет увеличиваться в размерах, а силы поверхностного натяжения и создаваемые ею напряжения сжатия будут уменьшаться. При этом диаметр капли ВТЭ станет равен критическому диаметру. Очевидно, что разрыв оболочки произойдёт, когда напряжения растяжения превысят напряжения сжатия от сил поверхностного натяжения.

Динамика предпламенных процессов и процесс горения эмульгированного топлива качественно отличается. Высокодисперсные частицы водной фазы, содержащиеся в объеме частиц

топлива, прогреваясь, преобразуются в паровые пузырьки, которые с высокой скоростью прорывают оболочку топливной частицы. При этом от объема топливной частицы в окружающее пространство выбрасывается мельчайшая частица топлива, ориентировочно равная объему парового пузырька. В объеме топливной частицы диаметром 40 мкм при водосодержании ВТЭ 15% содержатся 80 частиц водной фазы с размерным рядом частиц 5 мкм. Следовательно, частицы топлива диаметром 40 мкм последовательно распадаются на 80 частиц, с преобладающим размером 5 мкм, которые затем в результате «микровзрыва» распределятся в виде мельчайших частиц топлива в объеме камеры сгорания. Такие частицы быстрее прогреваются, испаряются, сгорают.

В эксплуатационных условиях главные судовые двигатели для определения эффективности использования топлива, воздействия ВТЭ на основные узлы и детали испытывались с концентрацией водной фазы от 5% до 20%, на всех режимах топливная аппаратура работала надёжно, без отказов. В соответствии с характеристиками высоковязкого топлива наибольшее снижение расхода топлива достигалось при концентрации водной фазы в диапазоне 10...12 %. Результаты испытаний разработанной системы приготовления и использования ВТЭ на ГД показали:

- для поддержания неизменной вязкости перед ТНВД необходимо увеличить температуру подогрева ВТЭ на 8...10 °С;

- при использовании ВТЭ при прочих равных условиях увеличиваются индексы ТНВД на 7...8 делений;

- на указанных режимах (табл. 4) при использовании ВТЭ уменьшается давление в конце сжатия и среднее индикаторное давление на 0,5 бар, а средняя температура выпускных газов по цилиндрам снижается на 6...7 °С (средние температуры выпускных газов до и после ГТН снижаются на 9 °С);

- водотопливные эмульсии с содержанием воды 10...12 % обладают высокой стабильностью и гомогенностью;

- перед стоянкой судна ГД должен проработать 20...30 мин на «чистом» топливе для предотвращения коррозии топливной аппаратуры и газовыпускного тракта;

- при переходе на ВТЭ при одном и том же положении рукоятки управления наблюдается понижение частоты вращения.

Использование ВТЭ с содержанием воды 12 % позволяет снизить расход топлива на 2,8...3,1 % за счёт улучшения качества смесеоб-

разования, а также понижается температура выпускных газов (на 8...10 °С) и максимальная температура в камере сгорания, что способствует уменьшению образования твердых углистых частиц сажи. Особенно важно, что при этом уменьшается содержание в отработавших газах чрезвычайно вредных оксидов азота, уменьшаются и отложения смолистых составляющих, а также отложения коррозионно-активных соединений натрия и ванадия в выпускном тракте и на лопатках турбин турбокомпрессоров.

Сбор данных о технико-экономической эффективности, о воздействии ВТЭ, гидродинамической кавитационно-ультразвуковой обработки топлива на показатели рабочего процесса дизелей, об износах цилиндропоршневой группы (ЦПГ) дизелей, топливной аппаратуры, элементов газовыпускного тракта, позволил провести системный анализ, сделать положительные выводы о перспективах дальнейшего применения ВТЭ в главных судовых дизелях.

Контроль за износом деталей ЦПГ осуществлялся во время проведения испытаний на ВТЭ главного двигателя 7ДКРН 80/160-4. Перед началом испытаний были произведены обмеры всех цилиндрических втулок дизеля, поршней, поршневых колец дизеля с составлением карты обмеров; произведена ревизия состояния топливной аппаратуры с заменой изношенных элементов; газовая турбина, выпускной коллектор были очищены от нагара. В процессе проведения испытаний периодически визуально осматривались поверхности цилиндрических втулок, поршней, производились замеры зазоров в канавках поршней. Регулировка главного двигателя осуществлялась на основании инструкции завода изготовителя. Изменения в процессе сгорания в цилиндрах двигателя отмечались на индикаторных диаграммах, так при работе на ВТЭ увеличивается индикаторная работа газов за цикл (площадь индикаторной диаграммы увеличивается), давление газов на выходе из цилиндров увеличивается, процесс сгорания завершается раньше на 30 ° п.к.в. (поворот коленчатого вала), температура отработавших газов снижается на 6...8 °С. Соответственно, снижается и теплонпряженность деталей ЦПГ. Зеркало цилиндрических втулок не имело лаковых отложений, следов прорыва газов, глубоких рисок, имело равномерный матовый блеск. Масляная пленка на зеркале цилиндра насыщается продуктами неполного сгорания топлива меньше, работает в более комфортном температурном режиме, что позволяет повысить надежность работы компрессионных

колец, снизить абразивный износ цилиндрических втулок.

Во время испытаний работы дизеля 6ДКРН 67/140-4 («Борис Ливанов») на ВТЭ осуществлялся контроль за износами деталей ЦПГ. Установленная перед началом испытаний новая цилиндрическая втулка после работы на ВТЭ в течение 2500 часов сохранила на своей поверхности следы обработки от хонингования. Нагар на головках поршней толщиной 2...3 мм с переводом работы на ВТЭ, вследствие газификации, разрыхлялся, а затем практически полностью через

200 часов удалялся с их поверхности. Компрессионные кольца оставались подвижными, их поверхность не имела рисок, лакообразований, следов пропуска газов.

После работы ГД 6ДКРН 67/140-4 («Сергей Лемешев») на ВТЭ в течение 5000 часов в процессе разборки двигателя цилиндропоршневая группа была осмотрена и обмерена. В результате проведенных замеров было установлено, что скорость износа цилиндрических втулок составила 0,06 мм на 1000 часов работы, скорость износа первого компрессионного кольца по ширине составила 0,75 мм на 1000 часов работы, по толщине – 0,05 мм на 1000 часов работы; скорость износа второго поршневого кольца по ширине также составила 0,75 мм на 1000 часов работы, по толщине – 0,02 мм на 1000 часов работы. Все кольца оставались легко подвижными. Проведенные замеры позволяют сделать вывод о том, что скорость износа основных деталей ЦПГ при работе двигателя на ВТЭ не превышает скорость износа при работе на топливе RME180. Осмотр газовыпускного тракта подтвердил резкое снижение нагарообразования при использовании ВТЭ, так в выпускных каналах, предохранительных решетках газотурбоагрегата имелись только легко удаляемые, отложения рыхлого нагара толщиной 0,1...0,2 мм, лопатки газовой турбины оставались чистыми без следов нагара, выпускные клапаны не имели следов газовой коррозии на уплотняющих поясках, на тарелке клапана наблюдались лишь незначительной толщины сажистые отложения.

Посадочная поверхность выпускных клапанов в связи с уменьшением в составе уходящих газов продуктов неполного сгорания топлива, снижением температуры отработавших газов не подвергалась интенсивному воздействию газовой коррозии, отложения нагара на тарелке, штоке клапана практически отсутствовали. Полное сгорание топлива и постоянная газификация

поверхности газовыпускного тракта при использовании ВТЭ повысили надежность работы газовых турбин, их лопатки, проточная часть оставались чистыми. Продувочные окна цилиндрических втулок также не имели существенных отложений нагара.

При работе дизеля на ВТЭ условия работы топливной аппаратуры (ТА) изменяются, об этом свидетельствует увеличение температуры корпуса ТНВД не менее, чем на 10 °С. Кроме того, настораживал сам факт подачи в ТА коррозионно-активной фазы – воды. Однако все элементы ТА с переводом на ВТЭ работали надежно, прекратилось коксование на соплах форсунок, поверхности игл распылителей оставались чистыми, без отложения смол, сульфидов. Прецизионные пары ТНВД и форсунок имели чистую, блестящую поверхность без следов отложения смол, были легкоподвижными, скорость изнашивания не увеличилась. Это объясняется тем, что в условиях топливной системы контакт прецизионных пар с воздухом, содержащим кислород (т.е. окислитель), исключён, поэтому коррозионная составляющая скорости изнашивания весьма ослабевает [17] – [22].

Использование ВТЭ с содержанием воды

12 %, приготавливаемую на базе высоковязкого тяжёлого топлива марки RME180 позволяет снизить содержание оксидов азота в отработавших газах дизелей до 10 г/кВт·ч.

Опыт эксплуатации топливной системы с гомогенизатором гидродинамической обработки тяжёлого топлива показал высокую эффективность и надёжность, технологические процессы по обработке жидкостей легко автоматизируются, подача топлива для обработки осуществляется штатными топливоподкачивающими насосами.

В настоящее время интерес представляет приготовление и использование ВТЭ на основе тяжёлого топлива марки RMG380 (500) в главных двухтактных крейцкопфных дизелях. Высоковязкое тяжёлое топливо RMG380 имеет повышенную вязкость (380 сСт при 50 °С), плотность, насыщено большим количеством тяжёлых фракций, содержит значительное количество серы (до 3,5 % S), золы, воды, механических примесей.

Для использования в судовых дизелях более дешёвого высоковязкого тяжёлого топлива марок RMG380 (500) используется штатная расходная система «закрытого» типа (рис. 4).

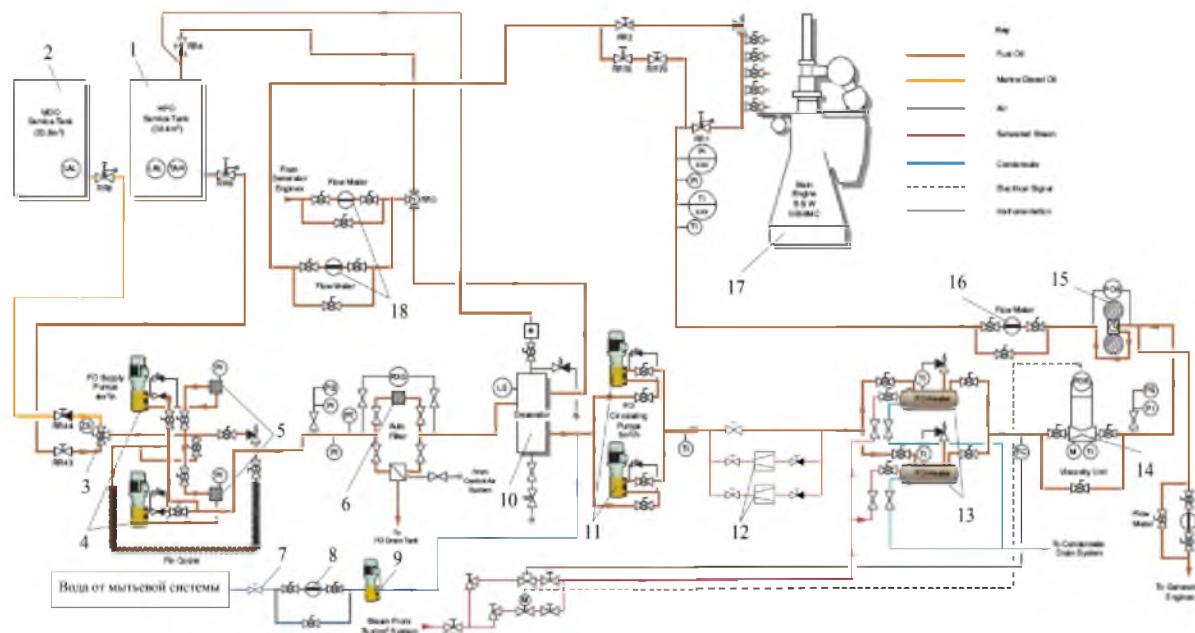


Рисунок 4 – Схема расходной системы тяжёлого топлива с модернизацией для приготовления и использования ВТЭ:
 1, 2 – расходные цистерны тяжёлого и дизельного топлива, 3 – трёхходовой клапан, 4 – бустерные насосы,
 5 – фильтр грубой очистки, 6 – автоматический фильтр, 7 – регулирующий клапан, 8 – расходомер, 9 – насос пресной воды, 10 – смешивательная цистерна, 11 – циркуляционные насосы, 12 – гомогенизатор,
 13 – топливоподогреватели, 14 – вискозиметр, 15 – фильтр тонкой очистки, 16 – расходомер,
 17 – главный двигатель, 18 – расходомер

Особенностью таких систем является то, что используются две пары подкачивающих насосов (бустерные 4 и циркуляционные 11), которые обеспечивают повышенное давление

топлива перед ТНВД до 8...10 бар. Такое повышенное давление позволяет производить подогрев топлива в подогревателе 13 до температуры 150 °С. Так как с ростом давления повышается

температура кипения топлива, что, в свою очередь, позволяет избежать вскипания топлива в контуре циркуляции при его нагревании перед ТНВД до температуры 150 °С. В случае вскипания топлива неизбежно парообразование в расходной системе, вызывающее нарушения в работе циркуляционных насосов, в частности, их кавитационные повреждения, стуки, вибрация топливопровода. Из-за этого происходит неустойчивая работа ТНВД и двигателя.

Температура подогрева зависит от вязкости применяемого топлива, а вязкость автоматически поддерживается на уровне 12...15 сСт с помощью системы автоматического поддержания заданной вязкости и вискозиметра 14. Именно при такой вязкости достигаются расчётные параметры факела (струи) и обеспечивается качественное распыливание и сгорание топлива.

Для приготовления и использования ВТЭ для работы главного двигателя штатная схема расходной топливной системы была дооборудована двумя гомогенизаторами 12 с арматурой и системой мытьевой воды, в состав которой входит регулирующий клапан 7, расходомер 8 и насос 9.

Для получения однородной мелкодисперсной ВТЭ необходимо, чтобы работал один или оба гомогенизатора одновременно (параллельная работа), что зависит от качества используемого топлива и процентного содержания воды в ВТЭ (рис. 4). Из смесительной цистерны топливо подаётся насосом 11 через гомогенизаторы 12 в топливopодогpевателю 13. Для приготовления

Таблица 5 – Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах при использовании ВТЭ на основе тяжёлого топлива RMG380

Нагрузка ГД, % (в % от номинальной)	Снижение содержания оксидов азота (NO _x) в отработавших газах (%) при содержании воды (%) в ВТЭ		
	8% H ₂ O	12% H ₂ O	15% H ₂ O
25	3,4	4,2	6,3
50	6,8	8,4	8,9
75	8,6	11,5	12,6
85	9,5	12,3	14,8

Для определения оксидов азота использовался переносной газоанализатор testo 340 фирмы «TestoAG» (Германия), который позволяет в режиме реального времени передавать данные измерений через Bluetooth непосредственно на ноутбук. Программное обеспечение позволяет осуществлять считывание, обработку, архивирование и управление данными измерений, создавать протоколы измерений.

По оценочным данным при содержании воды в ВТЭ до 20 % снижение выбросов оксидов азота на режиме полного хода может составлять

до 19,5 % . Фактически это означает, что при увеличении содержания воды в ВТЭ на 1%, концентрации оксидов азота в отработавших газах снижается на 1%.

ния и использования ВТЭ открывают регулирующий клапан 7 на водяном трубопроводе. В результате пресная вода с температурой 70...80 °С и давлением 0,45...0,5 МПа подаётся насосом 9 на всасывание циркуляционных насосов 11 и далее на гомогенизаторы 12, где и образуется ВТЭ. Контроль процентного содержания воды осуществляется расходомером 8, а клапаном 14 регулируется подача пресной воды.

Перевод работы главного двигателя на ВТЭ производится на установившемся режиме и включает следующие процедуры:

- снизить нагрузку ГД до 75% от полной;
- установить запорную арматуру на системе гомогенизации так, чтобы ВТЭ поступала от гомогенизаторов в топливopодогpевателю 13;
- запустить насос 9 и открыть регулирующий клапан 7, расход воды контролировать расходомером 8, а клапаном 7 отрегулировать нужный массовый расход пресной воды для приготовления ВТЭ.

При работе ГД на ВТЭ необходимо поддерживать вакуум на гомогенизаторах в пределах 0,5...0,6 бар. Величина вакуума является косвенным показателем качества приготовления ВТЭ (гомогенность, мелкодисперсность и стабильность эмульсии). При падении вакуума необходима разборка гомогенизатора и механическая очистка сопел вакуумной камеры.

Результаты испытаний гомогенизатора для приготовления и использования ВТЭ на основе тяжёлого топлива RMG380 на главном судовом двигателе 6ДКРН60/240 представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах при использовании ВТЭ на основе тяжёлого топлива RMG380

Также подтверждается что, за счёт использования ВТЭ улучшается качество смесеобразования, понижается температура выпускных газов и максимальная температура в камере сгорания, что способствует уменьшению образования твёрдых углистых частиц сажи и отложений смолистых составляющих, а также уменьшаются отложения коррозионно-активных соединений

натрия и ванадия в выпускном тракте и на лопатках турбин турбокомпрессоров.

Заключение. 1. Проблемы обеспечения экологической безопасности стали приоритетными для судовых компаний и дизелестроения. Помимо ограничений, связанных с оксидами серы и азота в отработавших газах дизельных двигателей на повестке дня в судоходной отрасли стоит снижение выбросов парниковых газов (CO₂). ИМО принята комплексная стратегия по снижению выбросов парниковых газов с судов на основе сбора данных по количеству используемого топлива. Новые экологические ограничения вынуждают судовладельцев к поиску наиболее эффективных и безопасных технических решений для снижения нормативных индексов энергетической эффективности судов.

2. В настоящее время для судовых дизелей основными являются более дешёвые тяжелые остаточные топлива, вязкость которых достигает 500 сСт. И эта величина постепенно поднимается в связи с более глубокой переработкой нефти, что приводит к снижению показателей качества и увеличению содержания примесей. Высоковязкое тяжёлое топливо марки RMG500 (ISO 8217-2017) применяемое для судовых дизелей – это крекинг-топливо с высоким содержанием асфальтосмолистых составляющих.

3. Разрабатываются и всё более эффективно применяются технологии гидродинамической обработки, позволяющие воздействовать на физико-химические свойства высоковязких тяжёлых топлив. Для этого в топливо вводятся присадки, интенсифицирующие процесс сгорания и уменьшающие эмиссию токсичных составляющих в окружающую среду, осуществляется перевод двигателей на водотопливную эмульсию, перед подачей в двигатель топливо гомогенизируется, обрабатывается высокочастотными ультразвуковыми колебаниями, сопровождаемыми кавитационными явлениями.

4. Произведена модернизация четырёхкамерного гомогенизатора для использования и приготовления топливных смесей и ВТЭ. Гомогенизатор состоит из четырёх последовательно включённых камер (по ходу движения топлива): вакуумной камеры, камеры ультразвуковых колебаний, камер смешивания и завихрения. Эмульгирование смеси происходит за счёт воздействия на смесь ультразвуковой энергии колебаний пластин, колеблющихся за счёт энергии движущейся струи жидкости. Эффект гомогенизации достигается в результате кавитации, возникающей в топливе под влиянием ультразвуковых колеба-

ний, а смешивание – за счёт сложного пути движения ВТЭ и дросселирования при проходе топлива через отверстия на выходе из камеры ультразвуковых колебаний.

5. В настоящее время интерес представляет использование ВТЭ на основе более дешёвого высоковязкого тяжёлого топлива марки RMG380 (500) в главных двухтактных крейцкопфных дизелях. Для приготовления и использования ВТЭ штатная судовая схема расходной топливной системы «закрытого типа» была дооборудована двумя гомогенизаторами с арматурой и системой пресной (мытьевой) воды.

6. Результаты эксплуатационных испытаний главного двигателя 6ДКРН60/240 при использовании ВТЭ на основе тяжёлого топлива RMG380 показали:

– применение эмульгированного топлива качественно изменяет процессы смесеобразования и сгорания в цилиндрах дизелей, эффективность процесса горения находится в прямой зависимости от степени измельчения и скорости движения частиц воды и топлива в камере сгорания в период формирования предпламенного процесса;

– использование ВТЭ с содержанием воды 12 % позволяет снизить расход топлива на 2,8...3,1 % за счёт улучшения качества смесеобразования, а также понижаются температура выпускных газов и максимальная температура в камере сгорания, что способствует уменьшению образования твёрдых углистых частиц сажи и замедлению реакций окисления азота;

– использование ВТЭ с содержанием воды 12 % позволяет снизить содержание оксидов азота в отработавших газах дизелей, при этом уменьшаются отложения смолистых составляющих, а также отложения коррозионно-активных соединений натрия и ванадия в выпускном тракте и на лопатках турбин турбокомпрессоров;

– проведённые замеры позволяют сделать вывод о том, что увеличения скорости износа основных деталей ЦПГ не зафиксировано, все компрессионные кольца оставались легко подвижными;

– с переводом ГД на ВТЭ топливная аппаратура работала надёжно, прекратилось коксование на соплах распылителей, поверхности игл распылителей оставались чистыми, без отложения смол, сульфидов; прецизионные пары ТНВД и форсунок имели чистую, блестящую поверхность без следов отложения смол, были легкоподвижными, скорость изнашивания не увеличилась (это объясняется тем, что контакт прецизионных пар с воздухом, исключён, поэтому кор-

розионная составляющая скорости изнашивания весьма ослабевает).

7. Применение четырёхкамерного гомогенизатора гидродинамической обработки высоковязкого тяжёлого топлива RMG380 (500) обеспечивает измельчению структуры органической части топлива, уменьшению размеров агломератов смол и асфальтенов, в результате увеличивается скорость сгорания в цилиндрах, улучшаются экологические и экономические показатели главных судовых дизелей.

Литература

1. Каракаев А.Б., Хекерт Е.В., Галиев Г.А. Методические основы структурно-функционального подхода в системном анализе // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – Т. 2. – № 1 (43). – С. 77-81.
2. Иванченко А. А., Петров А. П., Живлюк Г. Е. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2015. – № 3 (31). – С. 103-112.
3. Орехов Н.А., Полковников А.К., Гладьшев П.А. Анализ опыта использования водотопливных эмульсий на главных дизелях судов ОАО «Новошип» // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. Спец. выпуск «Проблемы водного транспорта». Ростов-на-Дону. – 2006. – Ч II. – С. 24-29.
4. Живлюк Г.Е., Петров А.П. Особенности развития экологически безопасных современных дизельных энергетических установок // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 3. – С. 581-596.
5. Возницкий И.В. Практика использования морских топлив на судах. 4-е изд. перераб.– СПб.: Моркнига, 2006. – 124 с.
6. Дорохов А. Ф., Патров Ф. В., Кабылбекова В. В. Адаптивное управление рабочим процессом судового дизеля при работе на водотопливных эмульсиях // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2014. – №2. – С. 7-16.
7. Овсянников М.К., Петухов В.А. Эффективность топливоиспользования в судовых дизельных установках. – Л.: Судостроение, 1984. – 96 с.
8. Сергеев Л.В., Вургафт А.В., Теренин И.Н. Смесобразование при работе дизелей на водотопливных эмульсиях // Двигателестроение. – 1990. – № 6. – С. 3-4, 22.
9. Теренин И.Н. Совершенствование системы питания водотопливными эмульсиями судовых вспомогательных дизелей с использованием поточного влагомера: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.08.05. – Астрахань, АГТУ, 2004. – 23 с.
10. Лебедев О.Н., Сомов В.А., Сисин В.Д. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях. – Л.: Судостроение, 1988. – 108 с.
11. Курников А.С., Панов В.С. Повышение показателей качества водотопливных эмульсий // Журнал университета водных коммуникаций. – 2010. – №8. – С. 30-33.
12. Горелик Г.Б., Коньков А.Ю., Кончаков Е.И. Возможности и перспективы применения водотопливных эмульсий в судовых дизелях в качестве альтернативного топлива // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 3 (37). – С. 101-106.
13. Горелик Г.Б., Коньков А.Ю. Оценка качества водотопливной эмульсии // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 4-5 (42). – С. 105-109.
14. Вольхин И.В., Катин В.Д. Совершенствование технологии подготовки к сжиганию водотопливных эмульсий // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2013. – № 1 (1). – С. 27-31.
15. Горячкин В.Ю., Корниенко В.С. Интенсивность коррозионных процессов в утилизационных котлах при сжигании водотопливных эмульсий // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2013. – № 2. – С. 101-110.
16. Патент №2689493 РФ, 28.05.2019. МПК F23K 5/12. Полковникова Н.А., Тимохин В.В., Полковников А.К. Устройство гомогенизатора гидродинамической обработки тяжёлого топлива для судовых дизелей. М.: РОСПАТЕНТ. Опубликовано: 28.05.2019, бюл. №16.
17. Кульчицкий А.Р., Голев Б.Ю., Атия А.М.А. Водотопливные эмульсии для дизелей // Мир транспорта. – 2011, – Т. 9. – № 3 (36). – С. 50-55.
18. Мельник Ю., Минакаева С.Н., Павлов С.Б., Харлампиди Х.Э. Влияние воды на характеристики дизельного топлива // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 24. – С. 123-125.
19. Андриященко С.П., Калашников С.А., Титов С.В. Сравнительный анализ вредных выбросов и процессов тепловыделения при работе высокооборотного дизеля на грубой и микрогетерогенной водотопливной эмульсии // Науч. пробл. транспорта Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск. – 2014. – № 1. – С. 360-362.
20. Андриященко С.П., Титов С.В., Попков В.В., Юр Г.С. Получение микрогетерогенной эмульсии дизельного топлива с водой // Науч. пробл. транспорта Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск. – 2012. – № 1. – С. 285-287.
21. Белов Е.А., Ломухин В.Б., Мироненко И.Г. Трибологические аспекты работы топливной

аппаратуры дизеля на эмульгированном топливе // Двигателестроение. – 2004. – №1. – С 38-40.

22. Ломухин В.Б., Мироненко И.Г. Скорость изнашивания деталей топливной аппаратуры судового дизеля на водотопливной эмульсии // Речной транспорт. – 2004. – №3. – С. 50-51.

REFERENCES

1. Karakaev A.B., Khekert E.V., Galiev G.A. Metodicheskie osnovy strukturno-funktional'nogo podkhoda v sistemnom analize // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2019. – T. 2. – № 1 (43). – S. 77-81.
2. Ivanchenko A. A., Petrov A. P., Zhivlyuk G. E. Energeticheskaya effektivnost' sudov i reglamentatsiya vybrosov parnikovyykh gazov // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. – 2015. – № 3 (31). – S. 103-112.
3. Orekhov N.A., Polkovnikov A.K., Gladyshev P.A. Analiz opyta ispol'zovaniya vodotoplivnykh emul'siy na glavnykh dizelyakh sudov OAO «Novoship» // Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhn. nauki. Spets. vypusk «Problemy vodnogo transporta». Rostov-na-Donu. – 2006. – Ch II. – S. 24-29.
4. Zhivlyuk G.E., Petrov A.P. Osobennosti razvitiya ekologicheskoi bezopasnykh sovremennykh dizel'nykh energeticheskikh ustanovok // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. – 2017. – T. 9. – № 3. – S. 581-596.
5. Voznitskiy I.V. Praktika ispol'zovaniya morskikh topliv na sudakh. 4-e izd. pererab. SPb: Morkniga, 2006. – 124 s.
6. Dorokhov A. F., Patrov F. V., Kabyzbekova V. V. Adaptivnoe upravlenie rabochim protsessom sudovogo dizelya pri rabote na vodotoplivnykh emul'siyakh // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. – 2014. – №2. – S. 7-16.
7. Ovsyannikov M.K., Petukhov V.A. Effektivnost' toplivoispol'zovaniya v sudovykh dizel'nykh ustanovkakh. – L.: Sudostroenie, 1984. – 96 s.
8. Sergeev L.V., Vurgaft A.V., Terenin I.N. Smeseobrazovanie pri rabote dizeley na vodotoplivnykh emul'siyakh // Dvigatelistroenie. – 1990. – № 6. – S. 3-4, 22.
9. Terenin I.N. Sovershenstvovanie sistemy pitaniya vodotoplivnymi emul'siyami sudovykh vspomogatel'nykh dizeley s ispol'zovaniem potochnogo vlagomera: Avtoreferat dis. kand. tekhn. nauk: 05.08.05. – Astrakhan', AGTU, 2004. – 23 s.
10. Lebedev O.N., Somov V.A., Sisin V.D. Vodotoplivnye emul'sii v sudovykh dizelyakh. – L.: Sudostroenie, 1988. – 108 s.
11. Kurnikov A.S., Panov V.S. Povyshenie pokazately kachestva vodotoplivnykh emul'siy // Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy. – 2010. – №8. – S. 30-33.
12. Gorelik G.B., Kon'kov A.Yu., Konchakov E.I. Vozmozhnosti i perspektivy primeneniya vodotoplivnykh emul'siy v sudovykh dizelyakh v kachestve al'ternativnogo topliva // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2017. – № 3 (37). – S. 101-106.
13. Gorelik G.B., Kon'kov A.Yu. Otsenka kachestva vodotoplivnoy emul'sii // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2018. – № 4-5 (42). – S. 105-109.
14. Vol'khin I.V., Katin V.D. Sovershenstvovanie tekhnologii podgotovki k szhiganiyu vodotoplivnykh emul'siy // Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. – 2013. – № 1 (1). – S. 27-31.
15. Goryachkin V.Yu., Kornienko V.S. Intensivnost' korrozionnykh protsessov v utilizatsionnykh kotlakh pri szhiganii vodotoplivnykh emul'siy // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2013. – № 2. – S. 101-110.
16. Patent №2689493 RF, 28.05.2019. MPK F23K 5/12. Polkovnikova N.A., Timokhin V.V., Polkovnikov A.K. Ustroystvo gomogenizatora gidrodinamicheskoy obrabotki tyazhelogo topliva dlya sudovykh dizeley. M.: ROSPATENT. Opublikovano: 28.05.2019, byul. №16.
17. Kul'chitskiy A.R., Golev B.Yu., Attiya A.M.A. Vodotoplivnye emul'sii dlya dizeley // Mir transporta. – 2011, – T. 9. – № 3 (36). – S. 50-55.
18. Mel'nik Yu., Minikaeva S.N., Pavlov S.B., Kharlampidi Kh.E. Vliyaniye vody na kharakteristiki dizel'nogo topliva // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2012. – T. 15. – № 24. – S. 123-125.
19. Andryushchenko S.P., Kalashnikov S.A., Titov S.V. Sravnitel'nyy analiz vrednykh vybrosov i protsessov teplovydeleniya pri rabote vysokooborotnogo dizelya na gruboy i mikroeterogennoy vodotoplivnoy emul'sii // Nauch. probl. transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. Novosibirsk. – 2014. – № 1. – S. 360-362.
20. Andryushchenko S.P., Titov S.V., Popkov V.V., Yur G.S. Poluchenie mikroeterogennoy emul'sii dizel'nogo topliva s vodoy // Nauch. probl. transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. Novosibirsk. – 2012. – № 1. – S. 285-287.
21. Belov E. A., Lomukhin V.B., Mironenko I. G. Tribologicheskie aspekty raboty toplivnoy apparatury dizelya na emul'gированном топливе // Dvigatelistroenie. – 2004. – №1. – S 38-40.
22. Lomukhin V. B. , Mironenko I. G. Skorost' iznashivaniya detaley toplivnoy apparatury sudovogo dizelya na vodotoplivnoy emul'sii // Rechnoy transport. – 2004. – №3. – S. 50-51.