

УДК 629.12.03

ГОРБОВ В.М., Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев
ГОРЯЧКИН А.В., **ТИМОШЕНКО Е.И.**, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Херсонский филиал, г. Херсон

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СЭУ ТАНКЕРОВ ПРИ СЖИГАНИИ ВОДОМАЗУТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

Розглянуті можливості підвищення ефективності СЕУ танкерів при спалюванні ВПЕ з урахуванням використання нафтозалишків і зниження корозійної активності газів.

Possibilities of raise efficiency by SPP of tankers at burning WFE at usage of the petroresiduals and decrease of corrosion activity of gases are considered.

1. Анализ состояния проблемы

Сжигание тяжелых остаточных топлив приводит к интенсификации процессов коррозии и загрязнения в котлах, к снижению технико-экономических показателей СЭУ, к увеличению эмиссии вредных веществ в окружающую среду. Поэтому большое значение приобретают мероприятия, направленные одновременно на снижение эмиссии вредных веществ и на повышение экономичности сжигания топлив в СЭУ за счет улучшения процессов горения, которые приводят к снижению токсичности дымовых газов до уровня современных требований охраны окружающей среды [1, 2].

При сепарации топлив и масел образуется значительное количество отходов: из топлива вместе с водой и механическими примесями удаляется до 3 % горючей высокомолекулярной части топлива, что снижает экономичность энергетической установки [3, 4]. Особенно большое количество нефтеостатков образуется в результате эксплуатации танкеров в связи с периодической мойкой грузовых танков. В среднем доля отмытых нефтеостатков составляет до 0,5 % количества перевезенных нефтепродуктов. Себестоимость топлива, получаемого из такого сырья, значительно выше, чем при его утилизации непосредственно на самом судне [4, 5]. С этих позиций экономически целесообразно использование нефтеостатков в

качестве вторичных топливно-энергетических ресурсов (ВТЭР).

Обработка обводненных нефтеостатков с использованием специальных технических средств позволяет получать водотопливные эмульсии (ВТЭ), сжигание которых возможно в любом котле с содержанием воды до 30...67 % [3, 6, 7, 8, 9]. Для сжигания нефтеостатков и мусора может быть использована топка вспомогательного котла, как принято в конструкции котла типа AQ-10 (Швеция) [4]. Жидкие нефтеостатки перед подачей на ротационную форсунку гомогенизируются в циркуляционном контуре. Опыт эксплуатации котлов типа AQ-10 (по данным фирмы) свидетельствует о том, что благодаря утилизации теплоты при сжигании отходов экономится до 30 % котельного топлива, а затраты на установку котла и системы подготовки отходов окупаются за 3 года [6]. При этом необходимо отметить, что КПД котла находится на уровне 84 %. Допустимое содержание воды в нефтеостатках 50 %.

По данным [5] в Новороссийском морском пароходстве разработана специальная технологическая система утилизации нефтеостатков, которая предусматривает применение гидродинамической и химической обработки нефтеостатков с помощью судового гомогенизатора (рис. 1).

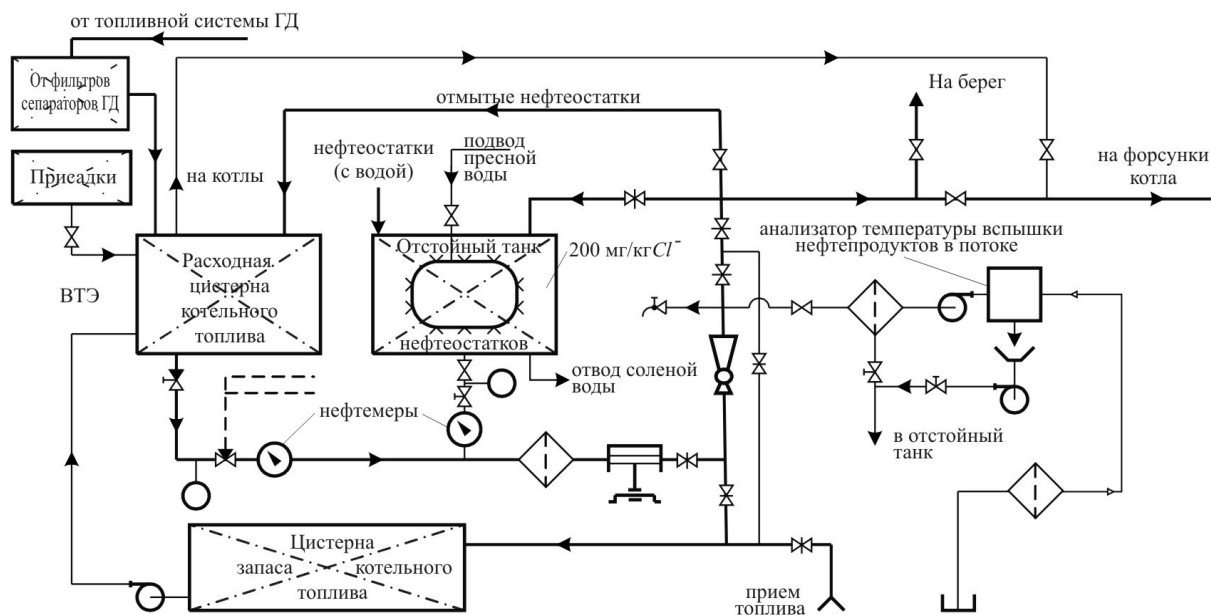


Рис. 1. Схема системы формирования запасов топлива для ВК при применении системы обработки нефтеостатков

Результаты проведенных испытаний по сжиганию гомогенизированных топливных смесей в виде ВТЭ в котлах типа КВГ-34К (танкеры типа "София") показывают, что их горение происходит так же, как и горение котельных топлив, нагары становятся более рыхлыми и менее абразивными, сажистые остатки не слипаются, низкотемпературная сернистая коррозия не наблюдается, благодаря введению специальных присадок, снижению содержания воды, непрерывному контролю температуры вспышки. Экономические преимущества такого способа очевидны: в каждый рейс, после которого проводится мойка грузовых танков, танкер принимает на 100...150 т меньше топлива (с учетом последующей утилизации отмытых нефтеостатков) и за счет этого принимает на 100...150 т больше груза. Анализ конструкций ВК танкеров [9] показывает, что в основном применяются котлы с естественной циркуляцией, КПД которых находится на уровне 80...85 %, так как они имеют только парообразующую поверхность (ПО) и даже при установке небольших газовых воздухоподогревателей (ГВП) из-за низкотемпературной коррозии (НТК) КПД удастся повысить до 88 % (например, котел типа КВ-2). Технические характеристики потребителей пара судна определяют параметры вырабатываемого котлами пара, значения которых зависят (как и паропроизводительность D) от назначения судна. Все эти факторы и привели к появлению большого разнообразия конструкций ВК (по данным [9] более 50 марок). Несмотря на низкие показатели безопасности, в качестве ВК применяют также огнетрубные, огнетрубно-водотрубные котлы, КПД которых находится на уровне 80...84 %. Конструкция этих котлов

относительно легко может быть приспособлена для обезвреживания нефтеотходов и мусора. На танкерах паропроизводительность ВК может достигать больших значений (до 50 т/ч). По данным [9] дальнейшее развитие мощных ВК типа КВ идет по принципиально новому направлению в компоновке поверхности нагрева с горизонтальным движением газов под пароводяным коллектором (котлы типа КВ-5), что позволит увеличить их скорость и снизить удельные массовые и габаритные показатели котлов.

В современных СЭУ с дизельными установками применяют две системы утилизации теплоты выхлопных газов. В системах с обычной утилизацией теплоты часто применяются утилизационные котлы (УК), имеющие только парообразующую поверхность (ПО), в которой генерируется обычно пар давлением 0,4...0,7 МПа. В этом случае температура газов за УК высокая (на уровне 190 °С). Теплоутилизационные контуры (ТУК) глубокой утилизации, работающие на ходовом режиме, обеспечивают экономию 4...6 % расхода топлива. В установках с УТГ обычно применяется УК прямоугольной формы, имеющий пароперегреватель, парообразующую поверхность и экономайзер, включенный в контур циркуляции. Включение экономайзера в контур циркуляции дает возможность обеспечить температуру воды на входе в него на уровне 120...140 °С для предотвращения НТК, что определяет температуру выхлопных газов за УК на уровне 160 °С и ограничивает глубину утилизации. Все более широкое внедрение в судовую энергетику высокоэкономичных ДВС приводит к снижению температуры выхлопных газов. Повышение температуры питательной воды перед УК приводит к

росту D до определенного уровня, но уменьшаются размеры экономайзера, что при фиксированной температуре воды на выходе из него и росте температуры воды на входе в экономайзер снижает глубину утилизации выхлопных газов. В этом случае экономайзер практически исчезает. Чтобы повысить паропроизводительность УК целесообразно установить вместо экономайзера ПО с низкими параметрами, нижний уровень которых, определяющий глубину утилизации, также ограничены необходимостью предотвращения НТК.

Для повышения паропроизводительности УК некоторые фирмы предложили уменьшение минимальной разности температур между газами и рабочим телом с $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $12\text{...}20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в отдельных случаях и до $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10]. Возникла потребность в УК, пригодных для использования газов пониженной температуры. Предложены комплексные системы утилизации теплоты с применением УК с двумя и даже тремя ступенями давления. В настоящее время по данным ЗАО «ЦНИИМФ» [10] на судах устанавливаются УК, вырабатывающие пар для теплофикационных целей (подогрев топлива, отопление, подогрев воды и т.п.). Паропроизводительность зависит также от величины кратности циркуляции K_c (с уменьшением K_c паропроизводительность растет). Поэтому представляет интерес предложение о создании прямоточного УК в составе газопаротурбинной установки (ГПТУ) [11]. Большие масса и габариты энергооборудования ее ТУК обусловлены наличием котла, сепаратора и циркуляционного насоса. При жестких ограничениях по массогабаритным характеристикам котельной установки может оказаться целесообразным переход от многократной принудительной циркуляции (МПЦ) к чисто прямоточному принципу циркуляции: из состава ТУК исключаются циркуляционный насос, сепаратор и соответствующие магистрали с арматурой. Для прямоточного котла также необходимы специальные мероприятия по защите его водяного экономайзера от НТК, скорость которой может составлять $0,25\text{ г}/(\text{м}^2 \times \text{ч})$ и более [12]. Поэтому необходим поверхностный подогреватель, включенный по воде в напорную магистраль питательного насоса. Температура воды за подогревателем может равняться $355\text{...}360\text{ K}$, что по мнению [12] с учетом относительно высокого качества топлива, используемого в ГПТУ (содержание серы $\leq 0,15\text{...}0,20\%$), достаточно для надежной защиты экономайзера от НТК.

Использование водотопливных эмульсий (ВТЭ) привлекает внимание исследователей и эксплуатационников простотой конструктивного оформления, а также возможностью одновременного решения ряда задач – экономичности ДВС, уменьшения нагарообразования, дымности

и токсичности отработавших газов, снижения уровня шума [3, 5, 6, 7, 8]. В ходе экспериментальных исследований [6] установлено, что добавление к топливу $5\text{...}10\%$ воды ускоряет процесс сгорания в $5\text{...}6$ раз. Во время проведения испытаний главных судовых дизелей 6ДКРН 74/160-3 оптимальное водосодержание ВТЭ, приготавливаемой на базе зарубежных мазутов IFO-40, IFO-180, поддерживалось в пределах $17\text{...}25\%$, расход топлива при этом снижался на $12\text{...}15\%$. При проведении испытаний работы дизель-генератора 6ЧН 25/34 на стенде дизелестроительного завода в Первомайске водосодержание ВТЭ достигало 50% [6]. Анализ испытаний, проведенных на 25 двигателях различной конструкции с использованием как дизельного, так и тяжелых сортов топлив, показал [5], что в большинстве случаев максимальная экономия топлива достигается при концентрации воды в ВТЭ, составляющей $10\text{...}20\%$. Максимальная величина экономии топлива $4,2\%$ достигнута при концентрации воды в топливе 18% . Снижение нагаров на деталях ЦПГ и газовыхлопном тракте составило 43% . Нагароотложения стали более рыхлыми, пористыми и легче удаляемыми. Существенно снизилась дымность выхлопа. Это позволило увеличить период между моточистками с 4000 до 7000 ч. Температура отработавших газов снизилась пропорционально увеличению концентрации воды в ВТЭ за счет расхода теплоты на испарение воды.

Проведенные исследования [13, 14] показывают, что сжигание ВТЭ с W^f до 30% обеспечивает возможность одновременно решать задачи защиты окружающей среды (уменьшается токсичность дымовых газов), повышения надежности работы котлов (снижаются коррозионные свойства дымовых газов), обеспечения максимально возможного энергосбережения при сжигании тяжелых остаточных топлив (предоставляется возможность увеличения КПД использования энергии уходящих газов).

2. Постановка, цели и задачи исследования

За счет использования нефтеостатков и продуктов сепарации и фильтрации топлива главных двигателей (ГД), что нами предлагается дополнительно включить в систему (рис. 1), предоставляется возможность по-новому формировать ВТЭР, что повлияет на величину запасов топлива для вспомогательных котлов. С целью оценки изменения запасов топлива для ВК при использовании ВТЭ необходимо учесть возможность увеличения экономии топлива в самом ВК и для ВК с учетом утилизации теплоты выхлопных газов ДВС на судне в ходовых режимах при сжигании ВТЭ. Для достижения поставленной цели был выполнен анализ технико-экономических характеристик СЭУ танкеров грузоподъемностью от 30000 до 140000 м^3 (главных двигателей, вспомогательных котлов),

выполнены расчеты теплоутилизационных контуров различных типов (одного и двух давлений) при температурных напорах за парообразующихся поверхностей 20 °С, а также 10 °С в соответствии с последними литературными данными [10].

3. Результаты исследований

Результаты обработки статистических данных показывают, что на среднетоннажных и крупных танкерах часовые расходы топлива на ГД и вспомогательных котлов (ВК) по значениям близки. Так как основная нагрузка на ВК наблюдается на отдельных режимах работы танкера (подогрев груза, мойка танков), то расходы топлива на рейс для ГД и ВК различаются приблизительно на 50 % (рис. 2).

Использование ВТЭ во вспомогательных котлах предоставляет возможность повысить КПД на 1...4 % при увеличении W^t до 10...15 % за счет улучшения качества горения вследствие “микровзрывов” капелек эмульсии [9]. Но надежность работы низкотемпературных поверхностей нагрева из-за НТК меняется мало. Как показали наши исследования [12] только при увеличении содержания воды в эмульсии до 30 % скорость НТК снижается в области “кислотного пика” при температурах стенки 100...115 °С до приемлемого уровня 0,2 мм/год, а рост скорости коррозии выше этого уровня начинается при температурах стенки выше 70...80 °С, что позволяет снизить температуру уходящих из котла газов ϑ_{yx} до 90...110 °С. Такое снижение J_{yx} предоставляет возможность повысить КПД вспомогательных котлов, а также глубину утилизации выхлопных газов ДВС и ГТД. Проведенные специальные расчеты показали (см. рис. 2), что при обеспечении предельной утилизации теплоты газов (при использовании прямоточной схемы в контурах высокого и низкого давлений, экономайзера для контуров при температурных напорах в контурах Δt_1 и Δt_2 на уровне 10 °С) при снижении ϑ_{yx} до 90 °С паропроизводительность УК 3-х давлений (кривая 1) может быть существенно повышена: она становится почти в 2 раза выше по сравнению с котлом 1-го давления (кривая 2) при тех же условиях ($\Delta t = 10$ °С и кратности циркуляции $K_{ц} = 1$). В этом случае при сжигании ВТЭ предоставляется возможность в ходовых режимах танкеров обеспечить более существенную экономию топливных ресурсов. В случае использования ВТЭ в топках ВК и нефтеостатков в качестве ВТЭР, установке УК 3-х давлений, с учетом дополнительной экономии топлива при движении судна в балласте, когда ВК не работает, исчезает необходимость в запасе топлива для ВК (рис. 2, б). Распределение паровой нагрузки и соответственно расходов топлива по режимам работы (и средние значения) для танкеров типа “Капелла” представлены на

рис. 3. При проведении расчетов было принято удельное значение паропроизводительности топлива для ВК 0,0792 кг топлива/кг пара (при $h = 84$ % и Q_p^p мазута М100 37,2 МДж/кг). Продолжительность рейса 720 ч (15 суток), из которых 621 ч ходовых режимов, при которых осуществляется экономия топлива для ВК. Расчеты паропроизводительности УК проведены на ЭВМ при температурных напорах за парообразующей поверхностью 20 °С и 10 °С. Анализ паровой нагрузки по режимам показывает, что с помощью утилизации удается полностью перекрывать потребность в паре в ходовом режиме в балласте даже при использовании УК 2-х давлений и УК 1-го давления ($K_{ц} = 1$) при $\Delta t = 20$ °С. При этом нет необходимости в использовании УК с более глубокой утилизацией. Таким образом, в течение 246 часов хода в этом режиме может быть сэкономлено 65,2 т топлива для ВК, которое может быть использовано при других ходовых и стояночных режимах. В ходовом режиме в грузу необходимо 218,17 т. В этом режиме УК 1-го давления при $\Delta t = 20$ °С даст возможность сэкономить 52,9 т; УК 1-го давления при $\Delta t = 10$ °С – 60,52 т; УК 1-го давления (при $K_{ц} = 1$) – 73,3 т. При использовании УК 2-х давлений (при $\Delta t = 20$ °С) – 85,6 т. Если обеспечить глубокую утилизацию газов до 100 °С путем установки УК 3-х давлений, то возможно сэкономить $\Delta B_{ук}^{э} = 127,2$ т. Следовательно, тогда необходимо иметь в запасе для ВК $218,2 - 127,2 = 91$ т (при использовании УК 3-х давлений) и $218,2 - 85,6 = 132,6$ т (при использовании УК 2-х давлений при $\Delta t = 20$ °С).

В режиме разогрева груза необходимо для вспомогательного котла 105,3 т. При использовании УК 2-х давлений экономится 27,5 т, при использовании УК 3-х давлений – 40,85 т. Следовательно, для ВК необходимо иметь в запасе $105,3 - 27,5 = 77,8$ т (при УК 2-х давлений); $105,3 - 40,85 = 64,45$ т (при УК 3-х давлений).

В режиме мойки танков для ВК необходимо 59,5 т топлива. При использовании УК 2-х давлений экономится 17,4 т, УК 3-х давлений – 25,85 т. Следовательно, для ВК необходимо иметь в запасе: $59,5 - 17,4 = 42,1$ т (при УК 2-х давлений); $59,5 - 25,85 = 33,65$ т (при УК 3-х давлений).

Таким образом, в ходовых режимах необходим запас топлива для ВК: при использовании УК 2-х давлений $132,6 + 77,8 + 42,1 = 252,5$ т; при использовании УК 3-х давлений $91 + 64,45 + 33,65 = 189,1$ т. Следовательно, при использовании ВТЭ, что позволяет обеспечить более глубокую утилизацию теплоты газов, запас топлива для ВК снижается на $252,5 - 189,1 = 63,4$ т.

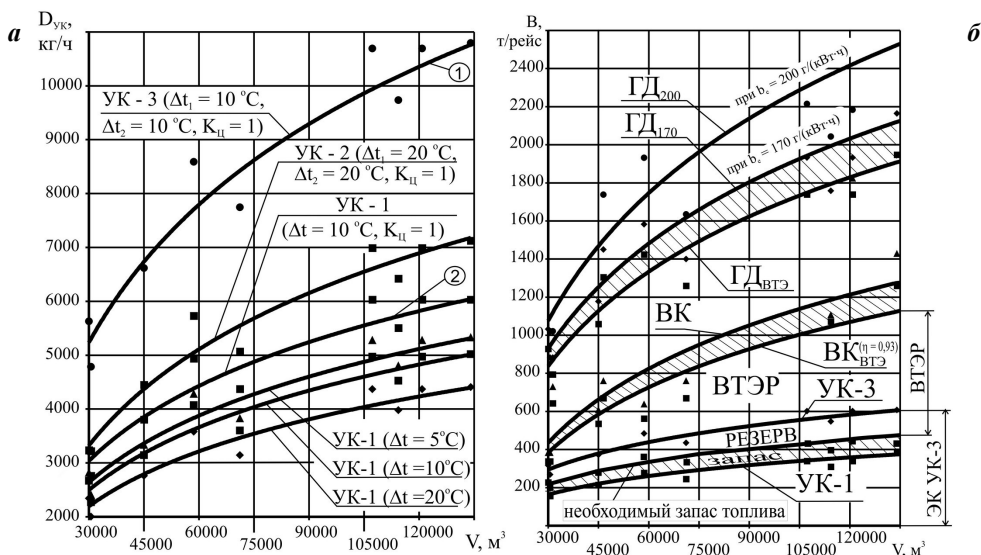


Рис. 2. Зависимость расходов пара в УК и топлива танкеров от их грузоподъемности

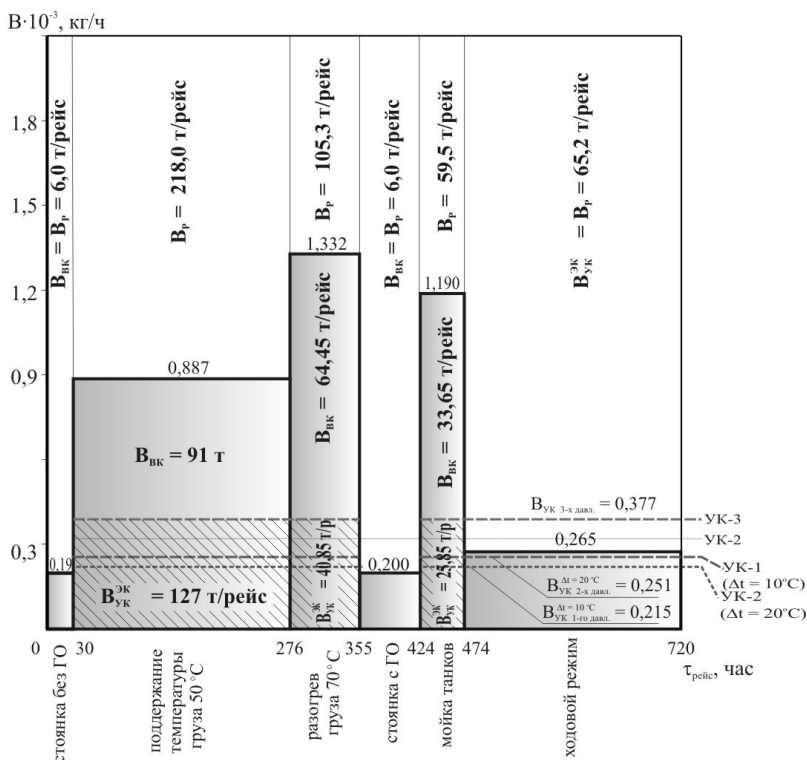


Рис. 3. Распределение расхода топлива по режимам работы танкера “Капелла” ($\tau_r = 720$ ч)

Для стояночных режимов необходим запас топлива: в стоянке без грузовых операций (ГО) 6,0 т и в стоянке с ГО 13,8 т. Следовательно, с учетом экономии топлива для получения пара в ВК необходимо: при использовании УК 2-х давлений $252,5 + 6 + 13,8 = 272,3$ т; при использовании УК 3-х давлений $189,1 + 6 + 13,8 = 208,9$ т.

Этот запас топлива может быть компенсирован частично или полностью при использовании ВТЭР, полученными при подготовке ВМЭ из нефтеостатков, образующихся при мойке танков, и продуктов фильтрации и сепарации

топлива ГД. В течение рейса возможно получение в виде ВТЭР 237 т топлива. Таким образом, при использовании ВТЭ и при использовании УК 2-х давлений при $\Delta t = 20$ °C необходим запас топлива для ВК в количестве $272 - 237 = 35$ т. При установке УК 3-х давлений с глубокой утилизацией выхлопных газов ГД до 100 °C наоборот возможна экономия топлива в количестве $237 - 209 = 28$ т.

На рис. 4 приведен пример формирования запасов топлива для вспомогательных котлов танкеров типа “Капелла”.

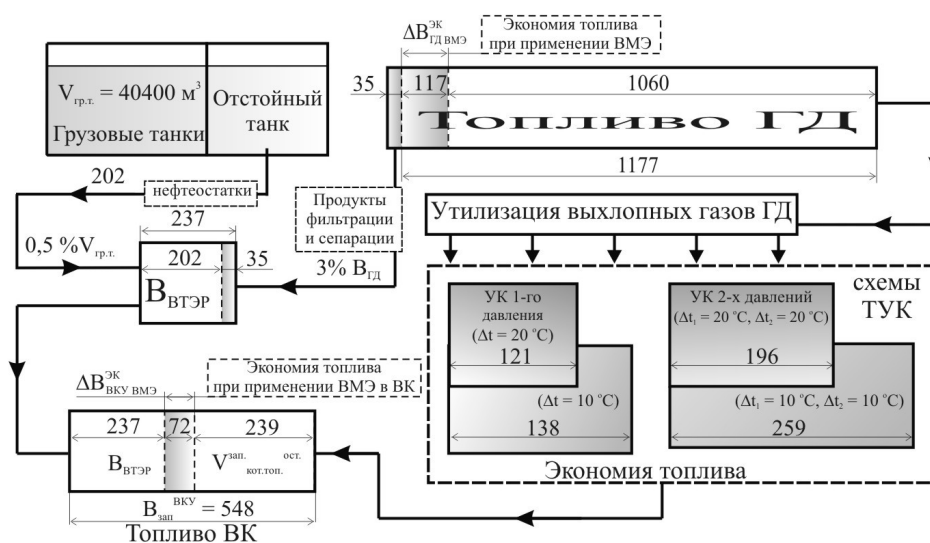


Рис. 4. Возможности формирования запасов котельного топлива для танкеров типа "Капелла" (в т/рейс)

Проведенные расчеты показывают, что в пределах точности расчетов паровых нагрузок и статистической обработки данных рассмотренных танкеров возможно даже достижение экономии топлива при использовании ВТЭ.

При переходе на сжигание ВТЭ кроме установки специально проектируемых ВК и УК предоставляется возможность на действующих дизельных установках обеспечить большую глубину утилизации путем установки дополнительных поверхностей нагрева экономайзера или подогревателя воды для систем горячего водоснабжения.

4. Выводы

1. Повышение КПД котлов при сжигании ВТЭ возможно из-за улучшения качества горения и существенного снижения скорости коррозии до допустимого уровня при температурах металла выше $70...80^\circ \text{C}$.
2. В связи с возможностью при сжигании ВТЭ подводить к экономайзеру котла питательную

воду с температурой $70...80^\circ \text{C}$ (благодаря снижению НТК) рекомендуется использование в утилизационном контуре схем, предусматривающих подвод воды из теплового ящика прямо на вход экономайзера УК. Это дает возможность снизить температуру выхлопных газов на выходе из УК со 160°C до $90...110^\circ \text{C}$, обеспечив увеличение глубины утилизации с 35 до $60...65\%$ в зависимости от суммарного a в ДВС или ГТД.

3. Возможность снижения $\vartheta_{ух}$ до $90...110^\circ \text{C}$ вследствие снижения интенсивности НТК позволяет существенно повысить КПД вспомогательных котлов до 93% без применения специальных мер по снижению низкотемпературной коррозии, увеличить глубину утилизации газов почти в $1,6$ раза, что обеспечит дополнительную экономию топлива на ходовых режимах судов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов В.В. Современные методы снижения содержания вредных веществ в отработанных газах судовых дизелей // Судостроение. – 1995. – № 8, 9. – С. 200.
2. Новиков Л.А. Основные направления создания малотоксичных транспортных двигателей // Двигателестроение. – 2002. – № 2.
3. Бондаренко Ю.Б., Костенко Е.И., Решетников И.П. Опытная система утилизации смывок сырой нефти // Судостроение. – 1981. – № 11.
4. Крыштын Л.К., Решетников И.П. Утилизация нефтяных остатков на морских судах. – М.: Транспорт, 1989. – С. 95.
5. Гатин В.Ю., Гимбутис К.К. Использование метода гомогенизации в системах топливоподготовки // Судостроение. – 1984. – № 4. – С. 24-25.
6. Сжигание топливных смесей и модернизированных мазутов (Новые технологии) // Судоходство. – 2004. – № 7-8. – С. 53-54.
7. Синайский Н.А., Гошей Т.А. Использование метода тяжелой кавитации для сжигания мазута и орэмульсии // Теплоэнергетика. – 2003. – № 6. – С. 76-80.
8. Эксплуатация производственных котлов КВГ-34К на водотопливной эмульсии / Ю.В. Якубовский, В.М. Суменков, Ю.С. Селезнев и др. // Рыбное хозяйство. – 1991. – № 3.
9. Енин В.И., Денисенко Н.И., Костылев И.И. Судовые котельные установки: Учеб. для вузов. – М.: Транспорт, 1993. – 216 с.
10. Смольник А. Направления развития систем утилизации тепла выпускных газов судовых дизелей // Морской флот. – 2005. – № 6. – С. 66-68.

11. Особенности утилизационного прямоточного котла для судовой комбинированной газопаротурбинной установки / А.М. Гуревич, В.И. Зинин, А.Г. Колесниченко, А.Я. Нагибин, В.Г. Пильдиш // Судостроение. – 1984. – № 4. – С. 22-24.
12. Романов В.А., Дмитриев Г.И., Щербинкин В.И. Низкотемпературная коррозия поверхности нагрева судового котла // Судостроение. – 1976. – № 4. – С. 32-35.
13. Горбов В.М., Горячкин А.В. Исследование интенсивности коррозионных процессов при сжигании водомазутных эмульсий // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – № 5 (391). – С. 87-95.
14. Горбов В.М., Горячкин А.В. Влияние состава и содержания оксидов азота и серы в газах на процессы в элементах ГТУ // Наукові праці: Науково-методичний журнал. – Т. 43. Вип. 30. Техногенна безпека. – Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2005. – С. 119-127.

Надійшла до редколегії 14.11.07.