

УДК: 621.431.74-611

Добровольский В.В., Солодовников В.Г.
ОНМА**ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ СОВРЕМЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ РАБОТАЮЩИХ НА ВЫСОКОВЯЗКИХ СОРТАХ ТЯЖЕЛЫХ ТОПЛИВ ВЯЗКОСТЬЮ 380 ММ²/С И ВЫШЕ**

В современных рыночных условиях морские и речные судоходные компании, основную материальную базу которых составляет транспортный флот, испытывают серьёзные экономические и финансовые трудности в конкурентной борьбе на мировом рынке транспортных услуг. Большинство транспортных судов эксплуатируются 10–20 лет судоходными компаниями.

Для сохранения своего присутствия на рынке судовладельцы вынуждены искать пути существенного сокращения собственных затрат с тем, чтобы не только конкурировать с другими судовладельцами, но и обеспечить уровень доходов, который бы создавал условия для расширенного воспроизводства. Судоходные компании реализуют сокращения собственных финансовых затрат различными путями, например снижением заработных плат экипажу, сокращением количества экипажа на судне, снижением основных эксплуатационных затрат за счет перехода на дешёвые сорта высоковязких топлив вязкостью выше 380 мм²/с. Один из перспективных методов снижения финансовых затрат является переход на путь оптимизирования энергопотребления и повышения энергоэффективности судов.

С 1 января 2013 года в соответствии с положениями Резолюции ИМО МЕРС.203(62) вступили в силу новые правила Конвенции МАРПОЛ, направленные на повышение энергоэффективности судов. На все новые суда, построенные после 1 января 2013 года, распространяются требования по расчету Конструктивного коэффициента энергоэффективности судна (EEDI), а для судов, находящихся в эксплуатации, с этой даты вводится требование по наличию на борту Судового плана управления энергетической эффективностью судна (SEEMP).

Цель работы - определить, сколько затрачивается непрерывно энергии на доподготовку высоковязкого топлива RMG 380 в топливной системе малооборотного двигателя внутреннего сгорания MAN

V&W 7S70MC, мощностью 21163 кВт, контейнеровоза E. R. Hamburg дедвейтом 26125 т, с часовым расходом топлива 2,108 м³/с при 46% нагрузки главного двигателя от номинальной. Минимизировать энергетические затраты на доподготовку высоковязкого топлива RMG 380 в топливной системе главного двигателя. Этим и обусловлена актуальность данного исследования.

На первом этапе исследований, был проведен анализ функционирования топливоподготовки, контейнеровоза E.R. Hamburg который показал, что на судне используется общепринятая система топливоподготовки двигателя, рекомендованная международным советом по двигателям внутреннего сгорания (СИМАС) [1]. Данная система включает в себе все предыдущие топливные системы, поэтому может быть рассмотрена как одна общепринятая система топливоподготовки, используемая в мировом судоходстве. Она состоит из последовательно включенных активных и пассивных элементов с двукратным резервированием, управляющие реологическими характеристиками топлив.

Основные процессы, которые в ней протекают: отстой; фильтрация; сепарация; нагрев; распыливание топлива; дозирование подачи и синхронизация с движением поршня. В настоящее время, при эксплуатации этой системы нет общепринятой концепции номинирования параметров работы ее элементов. Документы, регламентирующие подготовку топлива на судне, обычно состоят из нормативных документов классификационных обществ, инструкций завода строителя двигателя, изготовителя элементов топливной системы (насосов, фильтров, подогревателей и т.п.), анализов топлива, а также рекомендаций по поддержанию температуры топлива в танках запаса и перед ТНВД.

Высоковязкие топлива, которые используются в СЭУ, могут быть описаны несколькими моделями поведения жидкости – это ньютоновское поведение жидкости и неньютоновское поведение жидкости. Неньютоновское поведения жидкости, делится еще на ряд моделей – модель Шведова, Бингама и т.д. Графические зависимости ньютоновской и неньютоновской жидкости можно увидеть на графике рис. 1.

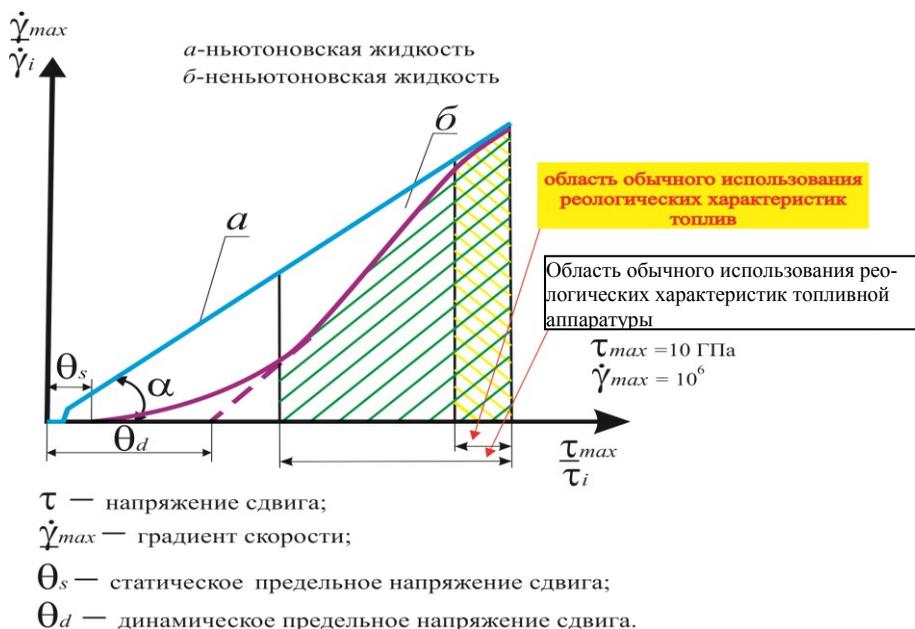


Рис. 1. Реологические зависимости «ньютоновской» и «неньютоновской» жидкости.

В научно-технической литературе, процессы, протекающие в высоковязких топливах в системах топливоподготовки СДВС, обычно для упрощения считаются имеющие линейную зависимость, т.е. описаны при помощи ньютоновской модели поведения. Хотя в области линейной зависимости работает небольшое число элементов топливной аппаратуры, например плунжер ТНВД. Все остальные элементы топливной системы в процессе ламинарного сдвигового течения обнаруживают нелинейное вязкопластичное течение.

Пространственное размещение молекул в кристалле «упаковка» тяжелого топлива должна следовать термодинамическому закону, выражающему стремление системы к минимуму свободной энергии [2]. Плотнейшая упаковка молекул должна достигаться при таких условиях, когда «выступы» конфигурации данной молекулы наилучшим образом заполняют «выемки» конфигурацией ее соседей (рис. 2). На рис. 2 показана схема упаковки молекул парафина в высоковязких топливах.

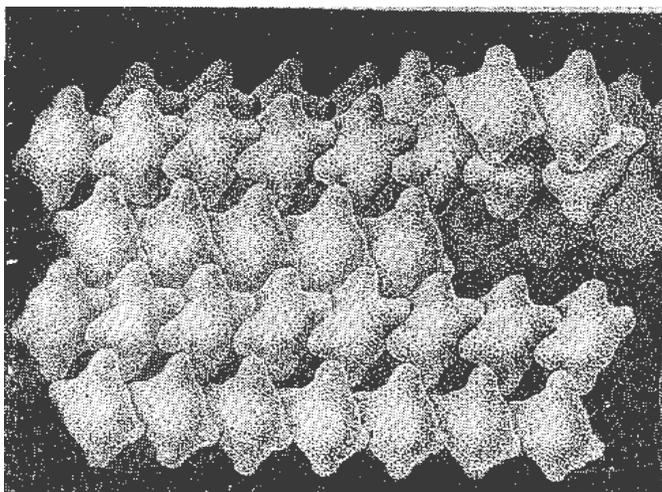


Рис. 2. Схема плотнейшей упаковки молекул в кристалле.

Целенаправленное регулирование молекулярной структуры высоковязких топлив, полярности, а также количества дефектов дисперсной фазы путем воздействия внешними параметрами, такими, как температура, давление, ультразвуковые и электрические поля, позволяют в ряде случаев добиться таких реологических свойств топлив, которые наиболее благоприятны для их сжигания в дизелях.

Подготовка высоковязких топлив в топливной системе, требует затраты энергии для перестройки ее структуры и получения однородных дефектов с линейным размером 20 мкм перед форсункой двигателя [3]. Размер дефекта структуры топлива в 20 мкм-он, обеспечивает формирование капли с линейным размером приблизительно 20 мкм, при выходе их сопла форсунки имеет скорость 200-300 м/с, и обеспечивает полное сгорание высоковязких топлив в дизелях.

Для определения непрерывно затрачиваемой энергии на до подготовку высоковязкого топлива RMG 380 в топливной системе главного малооборотного двигателя внутреннего сгорания, данная топливная система СИМАС была условно разделена на шесть последовательно включенных блоков [4], связанных короткими трубопроводами. Каждый блок состоит из последовательно включенных активных и пассивных элементов с двукратным резервированием, объединённых по принципу реализации одной из функций топливоподготовки, в пределах данного блока. Все параметры в пределах дан-

ного блока считаются сосредоточенными, и подчинены общему закону Бернулли.

Таким образом, процессы, протекающие в каждом из блоков топливной системы могут быть описаны известными физическими уравнениями:

- уравнение неразрывности (сплошности) потока:

$$Q = u_i \omega_i \quad \dots 6, \quad (1)$$

- уравнение Бернулли:

$$\frac{p_{i(0-0)}}{\gamma} + z_{i(0-0)} + \alpha \frac{u_{i(0-0)}^2}{2g} = \frac{p_{i(1-1)}}{\gamma} + z_{i(1-1)} + \alpha \frac{u_{i(1-1)}^2}{2g} + h_{f_i} + \sum h_{\omega_i},$$

$$i = 1 \dots 6, \quad (2)$$

$$\frac{p_{i(2-2)}}{\gamma} + z_{i(2-2)} + \alpha \frac{u_{i(2-2)}^2}{2g} = \frac{p_{i(3-3)}}{\gamma} + z_{i(3-3)} + \alpha \frac{u_{i(3-3)}^2}{2g} + h_{f_i} + \sum h_{\omega_i},$$

$$i = 1 \dots 6, \quad (3)$$

где $h_{f_i} = \lambda_f \frac{l}{d} \frac{u^2}{2g}, i = 1 \dots 6,$ (4)

- уравнение Дарси (потери напора по длине трубопровода);

$$h_{\omega_i} = \zeta \frac{u^2}{2g}, i = 1 \dots 6, \quad (5)$$

- местные потери напора в топливной системе;

- уравнение, определяющее количество тепла подведенного к топливу на -ом участке:

$$W_{i_{T_i}} = c_i m_i (T_{ik_i} - T_{i-1}), \quad \dots 6, \quad (6)$$

- закон Джоуля, определяющий количество электрической энергии, подведенное к элементам участка:

$$\dot{i}_{(3-3)} - P_{i(0-0)}$$

$$\dot{i} P_{\square}$$

$$\dot{i} Q_{i(1-1)}$$

$$\dot{i} W_{in} = \dot{i} \quad (7)$$

- суммарные энергетические затраты на подготовку топлива состоят из затрат энергии подведённой к электродвигателю насосов или сепаратора тяжелого топлива и количества тепла подведенного к топливу в i -ом блоке:

$$W_{i\Sigma} = W_{iT} + W_{in} \quad (8)$$

- суммарные энергетические затраты системы топливоподготовки МОДВС вычисляются по формуле

$$W = \sum_{i=1}^{i=6} W_{i\Sigma} \rightarrow \min. \quad (9)$$

Гидравлические потери напора по длине трубопровода h_f в системе топливоподготовки, рассчитываются согласно классическим уравнениям гидромеханики для трубопровода с диаметром трубы от 0,1 м до 0,254 м и длиной до 100 м. Они известны из справочников гидромеханики [5] и составляют 3%. Расчет энергозатрат системы топливоподготовки был произведен с учетом этих гидравлических потерь.

Реологические свойства топлив могут быть описаны в рамках жидкокристаллического состояния [6], [7]. Экспериментальные исследования структуры в судовых топливах были осуществлены методом диэлектрической спектроскопии в диапазоне частот 100Гц–30МГц [8], и подтверждают предположение, что тяжелые судовые топлива ведут себя как жидкокристаллические вещества [8].

На следующем этапе были проведены экспериментальные исследования рабочих параметров системы топливоподготовки. Экспериментальное исследование рабочих параметров системы топливоподготовки, проводилось согласно разработанной методики [9] для определения энергетических затрат на топливоподготовку тяжелого топлива МОДВС на судне E.R. Hamburg дедвейтом 26125 т, с главной силовой установкой MAN B&W 7S70MC, мощностью 21163 кВт, при 46% нагрузки главного двигателя от номинальной и секундном расходе топлива 0,0005856 м³/с.

Основные параметры топливной системы температуры и давления тяжелого топлива RMG 380 относительно длины трубопровода, снимались в реальном времени на судне. Для этого система топливоподготовки была оборудована дополнительными контрольно-измерительными приборами – манометрами и термометрами. До-

полнительные измерительные приборы были установлены в максимально приближенных местах к рассматриваемым сечениям.

В первом блоке системы топливоподготовки, реализуется преобразование структуры тяжелого топлива из твердого состояния в смектическую фазу S_c , с образованием дефектов структуры. Во втором блоке реализуется преобразование структуры тяжелого топлива из состояния смектической фазы S_c в смектическую фазу S_A , а также формирование дефектов структуры. В третьем и четвертом блоках реализуется преобразование структуры тяжелого топлива в пределах нематической фазы N , с формированием дефектов структуры в высоковязких топливах. В пятом блоке реализуется преобразование структуры тяжелого топлива из нематической фазы N в близкое к изотропному состоянию I , с формированием дефектов структуры топлива. В шестом блоке показанном реализуется управление структурой имеющую изотропную фазу, количеством и формой дефектов высоковязких топлив. Снятые параметры системы топливоподготовки давления, температуры, вязкости тяжелого топлива в реальном времени при постоянной нагрузке ГД 46%, а также полученные в результате экспериментальных исследований значения удельной теплоемкости и вязкости тяжелого топлива подставлялись в разработанную реологическую модель поведения процессов высоковязкого топлива в системе топливоподготовки МОДВС [9], которые описаны уравнениями (1)–(9) для шести блоков топливной системы. Расчет суммарных энергетических затрат системы топливоподготовки, был произведен в пакете MATLAB R2011b. Получены следующие результаты суммарных энергетических затрат на подготовку тяжелого топлива RMG 380:

I блок – $\Sigma W_I = 89,953$ кВт;

II блок – $\Sigma W_{II} = 69,29$ кВт;

III блок – $\Sigma W_{III} = 4,956$ кВт;

IV блок – $\Sigma W_{IV} = 0,487$ кВт;

V блок – $\Sigma W_V = 0,487$ кВт;

VI блок – $\Sigma W_{VI} = 15,513$ кВт;

$\Sigma W_{I-VI} = 208,967$ кВт.

Суммарные энергетические затраты на топливоподготовку тяжелого топлива RMG 380 при 46% нагрузки ГД от номинальной, составили 208,967 кВт (2,13%) от мощности главного двигателя.

Проверка погрешности разработанного метода выполнена на основании сравнения расчетных и экспериментальных данных опреде-

ление энергозатрат на топливоподготовку тяжелого топлива в топливной системе двигателя MAN B&W 7S70MC и не превышает 7%.

Следующим этапом исследований была оптимизация работы системы топливоподготовки малооборотных двигателей внутреннего сгорания.

В качестве целевой функции была выбрана величина энергетических затрат на топливоподготовку высоковязких топлив. Решение позволяющее минимизировать энергетические затраты на топливоподготовку, заключалось в назначении соответствующих рабочих параметров топливной системы - давлений и температур, которые удовлетворяют минимальному решению целевой функции.

Расчет суммарных энергетических затрат системы топливоподготовки был произведен в пакете MATLAB R2011b. Для решения данной методики нахождения минимальной функции были заданы пределы изменения основных параметров топливной системы p , T для топлива RMG 380.

Минимизация энергетических затрат на подготовку тяжелого топлива в VI-ом блоке системы топливоподготовки не рациональна. Причиной этого является ничтожно малое изменение давления в сечении (2 – 2) на выходе с ТНВД (196,1 МПа) при его регулировке путем изменения угла опережения подачи тяжелого топлива, по сравнению с давлением ТТ в сечении (0 – 0) и (1 – 1) перед ТНВД (840 кПа). Затраты энергии на топливоподготовку VI-го блока состоят из затрат энергии в ТНВД ГД и составляют 15,513 кВт. Также, отсутствие штатных манометров в сечениях (1 – 1) (перед ТНВД) и сечении (2 – 2) (после ТНВД) не позволяют определить параметры изменения давления при регулировке давлений в этих сечениях.

После подстановки заданных условий давлений и температур в программу MATLAB R2011b, были получены следующие результаты минимизирования энергетических затрат на топливоподготовку тяжелого топлива RMG 380.

I блок – $\Sigma W_I = 28,028$ кВт;

II блок – $\Sigma W_{II} = 44,11$ кВт;

III блок – $\Sigma W_{III} = 3,379$ кВт;

IV блок – $\Sigma W_{IV} = 0,403$ кВт;

V блок – $\Sigma W_V = 19,807$ кВт;

VI блок – $\Sigma W_{VI} = 15,513$ кВт;

$\Sigma W_{I-VI} = 111,513$ кВт.

Суммарная минимизация энергетических затрат на топливоподготовку всей топливной системы, при возможности регулировки основных параметров топливной согласно заданным пределам системы p , T для тяжелого топлива RMG 380 составляет– 111,513 кВт, т.е. снижение затрат на 46,64 % (97,45 кВт).

Окончательную настройку основных параметров топливной системы p , T на данной нагрузке ГД согласно выбранным пределам минимизации нет возможности реализовать в связи с конструктивными особенностями данной системы. Поэтому перенастройка основных параметров топливной системы p , T была произведена не для всех выбранных пределов.

Для I блока, была произведена только настройка температур подогрева тяжелого топлива по танкам запаса.

Для II блока, была произведена настройка температур подогрева тяжелого топлива в отстойных танках тяжелого топлива и подогревателя топлива для сепаратора тяжелого топлива, а также давления всасывания и нагнетания топливоподающего насоса сепаратора тяжелого топлива согласно выбранным пределам минимизации.

Для III блока, была произведена настройка давления входа и выхода в сепаратор тяжелого топлива согласно выбранным пределам минимизации.

Для IV блока, была произведена настройка давления всасывания и нагнетания бустерного насоса согласно выбранным пределам минимизации.

Для V блока, была произведена настройка температур подогрева тяжелого топлива в подогревателе тяжелого топлива главного двигателя, а также давления всасывания и нагнетания циркуляционного насоса тяжелого топлива главного двигателя согласно выбранным пределам минимизации.

После перенастройки основных параметров топливной системы p , T согласно выбранным пределам минимизации, были сняты параметры системы топливоподготовки в реальном времени на постоянной нагрузке ГД 46% и произведен расчет энергозатрат топливной системы. Расчет суммарных энергетических затрат системы топливоподготовки, был произведен в пакете MATLAB R2011b. Получены следующие результаты суммарных энергетических затрат на подготовку тяжелого топлива RMG 380 после настройки:

I блок – $\Sigma W_I = 41,195$ кВт;

II блок – $\Sigma W_{II} = 49,14$ кВт;

III блок – $\Sigma W_{III}=4,304$ кВт;

IV блок – $\Sigma W_{IV}=0,366$ кВт;

V блок – $\Sigma W_V=24,052$ кВт;

VI блок – $\Sigma W_{VI}=15,513$ кВт;

$\Sigma W_{I-VI}=134,57$ кВт.

Произведенная настройка параметров системы топливоподготовки температур и давлений, согласно полученным результатам методики минимизации энергетических затрат на топливоподготовку снизила энергозатраты на 35,6% (74,4 кВт). Это позволило сэкономить 5.39 м.т. тяжелого топлива – 3773 \$ USD (при условной стоимости 1 м.т. топлива 700 \$ USD) за время 126.7 часов на переходах в море при эксплуатационной нагрузке ГД 46%.

За время календарного года, исключая работу на маневренных режимах, рейдовых и портовых стоянок, экономия тяжелого топлива RMG 380 после произведенной настройки основных параметров топливной системы, составляет 113.71 м.т., что при условной стоимости 700 \$ USD за одну 1 м.т., составляет 79597 \$ USD/год.

Зависимость энергетических затрат на подготовку тяжелого топлива RMG 380 до регулировки основных параметров топливной системы, зависимость энергетических затрат после минимизации энергетических затрат на подготовку тяжелого топлива RMG 380 и зависимость энергетических затрат после регулировки основных параметров топливной системы изображены на рис. 3.

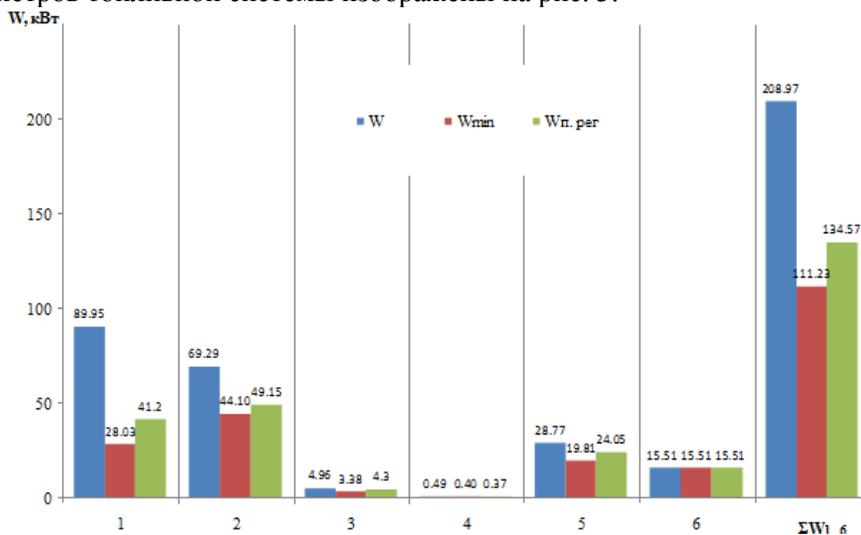


Рис. 3. Зависимость энергетических затрат на топливоподготовку тяжелого топлива RMG 380.

Выводы.

Измерение величины энергетических затрат системы топливоподготовки судового малооборотного двигателя MAN B&W 7S70MC, работающего на тяжелом топливе RMG380 показывает, что величина расходов составляет 2,13 % от мощности ГД.

Для оценки энергетической эффективности работы системы топливоподготовки тяжелого топлива в качестве целевой функции была выбрана величина энергетических затрат на подготовку тяжелого топлива RMG 380 и выполнена минимизация целевой функции путем оптимизации основных параметров системы топливоподготовки (давлений и температур).

Использование методики минимизации энергетических затрат на топливоподготовку тяжелого топлива RMG 380, при дополнительной модификации топливной системы, позволит обеспечивать снижение абсолютной величины энергетических затрат в процессе топливоподготовки малооборотного двигателя MAN B&W 7S70MC на 46,64 %.

Настройка основных параметров топливной системы согласно выбранных пределов давлений и температур, позволила снизить энергозатраты на топливоподготовку тяжелого топлива RMG 380 на 35,6 %.

Экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы на контейнеровозе «E.R. Hamburg» при использовании тяжелого топлива RMG 380, составляет экономию 5,39 м.т. тяжелого топлива – 3773 \$ USD (при условной стоимости 1 м.т. топлива 700 \$ USD) за время 126,7 часов на переходах в море при эксплуатационной нагрузке ГД 46% или 113,71 м.т за время календарного года, исключая работу на маневренных режимах, рейдовых и портовых стоянок стоимостью 79597 \$ USD/год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Камкин С.В. Эксплуатация судовых дизельных энергетических установок: Камкин С. В. Эксплуатация судовых дизелей [Текст] : Учебник для ВУЗов / С. В. Камкин, И. В. Возницкий, В. Ф. Большаков – М. : Транспорт, 1996. – 432 с.

Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения [Текст] / А. С. Ахматов. – М. : Физматгиз, 1963. – 472 с.

Лышевский А. В. Распыливание жидкостей [Текст] / А. В. Лышевский – М. : Машиностроение, 1977, – 208 с.

Добровольский В.В. Энергетические затраты на топливоподготовку судовых малооборотных двигателей / В.В. Добровольский, С.А. Ханмамедов // Вісник НУК. – 2010. - №5(434). – Николаев: НУК. – С. 97-104.

Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] // Под ред. М. О. Штейнберга.–3–е изд., перераб. и доп.–М.: Машиностроение, 1992.–672 с.

Кардаш В.П., Ханмамедов С.А. Повышение эффективности эксплуатации судовых устройств // Судовые энергетические установки: науч.–техн. сб.–2007.–Вып. 18–Одесса: ОНМА.–с.70–77.

Капустин А.П., Капустина О.А. Акустика жидких кристаллов // Москва и издательство наука, 1986.–248 с.

Добровольский В.В. Энергетические затраты на топливоподготовку судовых малооборотных двигателей / В.В. Добровольский, Л.В. Пизинцали // Проблеми техніки: на-ук.-техн. збірн. – 2010. – Вип. 3. – Одеса: ОНМУ. – С. 129 – 137.

Добровольский В.В. Энергосберегающая технология подготовки высоковязких топлив малооборотных двигателей внутреннего сгорания [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03 / Добровольский Валерий Валериевич ; Одес. нац. мор. акад. - О., 2012. – 243с .