

УДК 621.577.4

И. В. КАЛИНИЧЕНКО

Национальный университет кораблестроения, Херсонский филиал, Украина

ТЕПЛОВОЙ НАСОС В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ СУДОВОЙ ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКИ

Проанализированы возможные источники низкопотенциальной теплоты судового главного дизеля с целью ее утилизации теплонасосной паропроизводящей установки. Проведен анализ возможности обеспечения водяным паром судовых потребителей на ходовом режиме судна при использовании теплонасосной паропроизводящей установки, утилизирующей низкопотенциальные вторичные тепловые ресурсы главного дизеля. Использование теплонасосной паропроизводящей установки в качестве альтернативного источника получения водяного пара на судне позволило бы, во-первых, утилизировать сбрасываемую теплоту дизеля, уменьшая тем самым тепловое загрязнение окружающей среды, во-вторых, отказаться от работы вспомогательного котла на ходовом режиме судна, а, следовательно, сэкономить невозобновляемые источники энергии.

Ключевые слова: теплонасосная паропроизводящая установка, рабочий агент, главный дизель, низкопотенциальная теплота, утилизация, водяной пар.

1. Состояние проблемы.

Анализ последних исследований и публикаций

Утилизация вторичных тепловых ресурсов судового главного двигателя (ГД) традиционно является одним из основных методов и технологий повышения эффективности комплексного использования топливно-энергетических ресурсов судовой энергетической установки (СЭУ). Теоретические исследования и разработки систем повторного использования теплоты ГД, в первую очередь судовых дизельных установок (СДУ), успешно реализованы на морских судах [2, 5]. Однако на сегодняшний день ситуация с утилизацией теплоты СДУ на транспортном флоте качественно изменилась. Повышение КПД ГД (КПД современных малооборотных судовых ГД составляет от 48,0 до 51,0 %) и снижение удельного расхода топлива сопровождается перераспределением статей их теплового баланса: уменьшение потерь с отходящими газами (ОГ) и снижение температуры ОГ (температура ОГ двигателей фирмы "MAN Diesel & Turbo" снизилась до 235...265 С, а двигателей фирмы "Wartsila" - до 257...298°С) при одновременном возрастании доли теплоты, отводимой в охладителе наддувочного воздуха (ОНВ) [8, 9]. Эти факторы в совокупности резко снижают эффективность традиционных схем утилизации теплоты. Становится затруднительным одновременное обеспечение паром как подогревателей различных сред на судне, так и утилизационного турбогенератора, что приводит к необходимости ввода в работу вспомогательного котла (ВК) [6]. Как

один из вариантов решения этой проблемы – применение теплонасосных паропроизводящих установок (ТНПУ) для выработки водяного пара, для которых источником потребляемой теплоты низкого потенциала являются вторичные тепловые ресурсы ГД. Это позволило бы, во-первых, утилизировать сбрасываемую теплоту, уменьшая тем самым тепловое загрязнение окружающей среды, во-вторых, отказаться от работы ВК на ходовом режиме судна, а, следовательно, сэкономить невозобновляемые источники энергии (котельное топливо).

Теплонасосное направление утилизации вторичных тепловых ресурсов СДУ для производства водяного пара уже рассматривалось [4, 5]. Однако приведенных в источниках данных недостаточно для оценки перспективности теплонасосного направления утилизации низкопотенциальной теплоты СДУ. Параметры работы дизелей даны для устаревших моделей, не обоснован выбор рабочего агента,.

Целью исследования является анализ целесообразности и технической возможности обеспечения водяным паром судовых потребителей в ходовом режиме при использовании теплонасосной паропроизводящей установки.

2. Изложение результатов исследования

В качестве судна-прототипа для проведения расчетного исследования был выбран танкер проекта 15966 (типа "Григорий Нестеренко"), водоизмещением $D=35970$ т, разработки ЦКБ "Изумруд" (г. Херсон). Выбор этого типа судна определялся

тем, что танкерный флот характеризуется, во-первых, большими мощностями установленных ГД, и, во-вторых, значительными потребностями в водяном паре для подогрева топлива дизелей и перевозимого груза, а также для функционирования различных общесудовых систем и систем двигателей. Согласно судовой спецификации на танкере установлены: ГД марки 6ДКРН 60/195-10 номинальной мощностью $Ne_{\text{ном}}^{\text{ГД}} = 9370$ кВт; ВК марки КАВ 6,3/7 паропроизводительностью $D_{\text{ВК1}} = 6,3$ т/ч и ВК марки КАВ 16/16 паропроизводительностью $D_{\text{ВК2}} = 16$ т/ч; УК марки КУП 660 паропроизводительностью $D_{\text{УК}} = 5,4$ т/ч; три вспомогательных дизель-генератора (ВДГ) марки KRG-6 фирмы "Bergen Diesel" мощностью по $Ne_{\text{ном}}^{\text{ВДГ}} = 880$ кВт; водоопреснительная установка (ВОУ) марки Д5-У производительностью по пресной воде 20...25 т/сутки [7].

Выбор параметров работы ТНПУ определяется, с одной стороны, параметрами охлаждающей воды ДВС, являющейся источником НПТ, а с другой, – наличием на судне потребителей пара, в первую очередь, подогревателей груза. Анализ параметров судовых потребителей тепловой энергии показывает, что они могут быть разделены на три основные группы: использующие водяной пар низкого (0,3 МПа), среднего (0,5 МПа) и высокого (до 0,9 МПа) давлений [6]. Первоначально рассматривалась работа ТНПУ с получением пара всех трех параметров. Однако, учитывая возможность термического разложения хладонов, являющихся рабочим телом ТНПУ, и с целью упрощения установки окончательно была принята схема согласно рис. 1. При этом предполагалось, что водяной пар давлением 0,9 МПа вырабатывается в традиционном утилизационном водяном котле за счет теплоты ОГ ГД.

Принцип работы и выбор рабочего агента ТНПУ изложены в [1, 3].

Так как для поддержания во время рейса температуры груза 40...60 °С достаточно водяного пара давлением $P_{\text{ВП}} = 0,3$ МПа (температура насыщения $t_{\text{ВП}} = 133$ °С), то температура конденсации рабочего агента ТНПУ должна быть не менее 144 °С. При выработке водяного пара давлением $P_{\text{ВП}} = 0,5$ МПа ($t_{\text{ВП}} = 152$ °С) температура конденсации рабочего агента ТНПУ должна быть не менее 163 °С.

В качестве ГД танкера рассматривались современные малооборотные супердлинноходные дизели: 6RTA52U-B фирмы "Wartsila-NSD" (Финляндия) полной (номинальной) мощностью $Ne_{\text{ном}}^{\text{ГД}} = 9600$ кВт и 6S50ME-C8-ТП фирмы "MAN B&W" (Дания) мощностью $Ne_{\text{ном}}^{\text{ГД}} = 9960$ кВт. Для каждого из дизелей был проведен анализ возможных источников НПТ в системе охлаждения ДВС.

Для обоих дизелей применена трехконтурная система охлаждения. Результаты расчетов согласно данным фирм-разработчиков [8, 9] показали, что наибольший температурный потенциал среди источников НПТ имеет пресная вода, охлаждающая втулки цилиндров (температура на выходе из дизеля 80...85 °С). Это делает её наиболее предпочтительным источником НПТ для работы ТНПУ. Схема совместного подключения к этой системе ВОУ и ТНПУ для утилизации теплоты $Q_{\text{ХРЦ}}$ представлена на рис. 2.

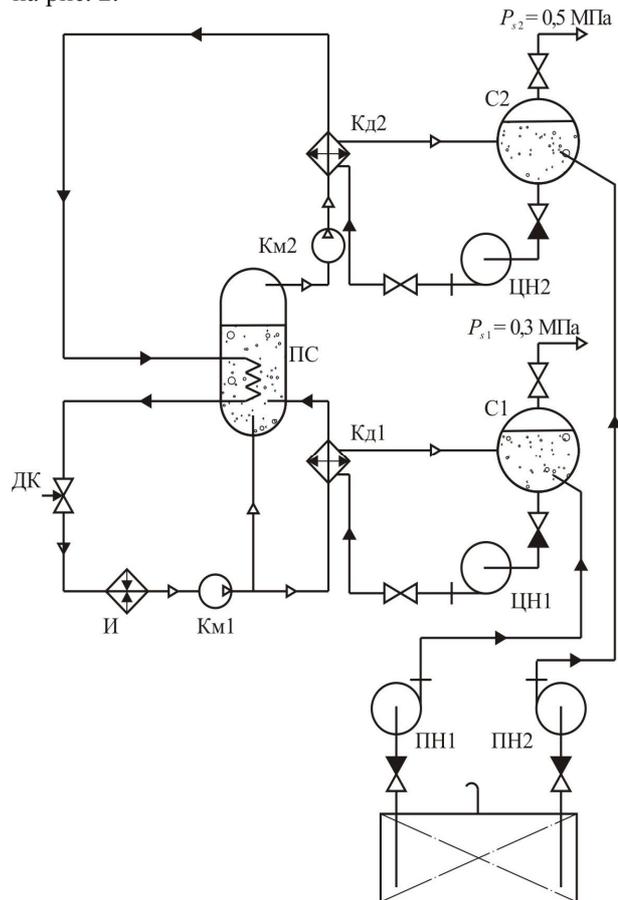


Рис. 1. Принципиальная схема теплонасосной паропроизводящей установки двух давлений (цифры 1 и 2 в конце обозначений соответствуют аппаратам первой и второй ступени): ДК – дроссельный клапан; И – испаритель; Кд – конденсатор; Км – компрессор; ПН – водяной питательный насос; ПС – промежуточный сосуд; С – сепаратор водяного пара; ЦН – водяной циркуляционный насос

Результаты расчетов показали, что избыток теплоты пресной воды системы охлаждения рубашек цилиндров ДВС, которая может быть использована в качестве источника НПТ для ТНПУ, составляет:

- для двигателя 6RTA52U-B

$$Q_0 = Q_{\text{ХРЦ}} - Q_{\text{ВОУ}} = 1862 - 743 = 1119 \text{ кВт};$$

- для двигателя 6S50ME-C8-ТII

$$Q_0 = Q_{ХРЦ} - Q_{ВОУ} = 1450 - 743 = 707 \text{ кВт.}$$

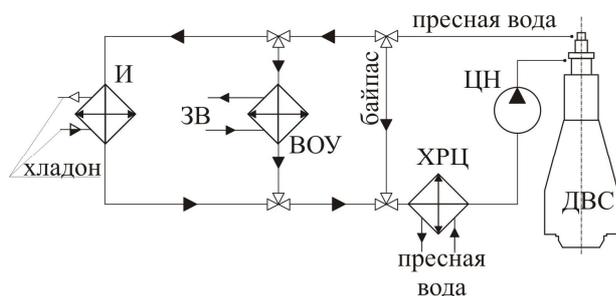


Рис. 2. Схема подключения испарителя ТНПУ к системе охлаждения дизеля: И – испаритель теплового насоса; ЗВ – заборная вода; ВОУ – водоопреснительная установка; ХРЦ – холодильник системы охлаждения рубашки цилиндров ДВС; ЦН – циркуляционный насос

Выбор хладагента – рабочего тела ТНПУ проводился с учетом его эксплуатационных свойств (высокая критическая температура, невысокое давление конденсации, отсутствие вакуума в испарителе, химическая стабильность при воздействии высокой температуры и др.) и экологических характеристик. В результате для расчетов циклов ТНПУ был выбран хладагент R123 (CF_3CHCl_2), который относится к так называемым гидрохлорфторуглеродным хладагентам (ГХФУ или HCFC) с низкой озоноразрушающей активностью. Согласно решению Венской конвенции, производство хладагентов группы ГХФУ разрешено до 2030 г. В промышленности хладагент R123 используют для ретрофита холодильных установок – водоохладителей, работающих на R11. По экологическим параметрам хладагент R123 имеет следующие характеристики: потенциал озо-

нового истощения (ODP) равен 0,02; потенциал глобального потепления (GWP) – 90; не горюч, взрывобезопасен, в 6 раз менее токсичен аммиака [www.freonrf.ru/e/80542-freon-123].

При расчетном исследовании интегральных показателей ТНПУ (рис. 1) принималось, что расход G_1 рабочего агента через конденсатор нижней ступени Кд1 составляет 30 % общего расхода G_0 хладагента в системе. Исходные данные: температура питательной воды $t_w = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; адиабатный КПД хладагенового компрессора $\eta_{ад} = 0,82$; КПД ВК $\eta_{ВК} = 0,85$; удельный расход топлива ВДГ $g_c = 0,2 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$. При сравнении расхода топлива в ВДГ и ВК величина нижней теплоты сгорания топлива Q_p^H была приравнена к значению для стандартного топлива.

Результаты расчета интегральных показателей ТНПУ для рассматриваемых ГД танкера проекта 15966 представлены в таблице.

Проведенные расчетные исследования (см. табл.) показали несомненные энергетические преимущества от установки на судне ТНПУ.

Выводы

1. Наиболее предпочтительным источником НПТ для работы ТНПУ является пресная вода, охлаждающая рубашки цилиндров ГД, имеющая температуру на выходе из дизеля $80 \dots 85 \text{ }^\circ\text{C}$. Количество теплоты этого источника достаточно для одновременной работы ТНПУ и ВОУ.

2. Проведенные расчетные исследования показывают энергетическую целесообразность использования ТНПУ для получения водяного пара давлением $0,3 \dots 0,5 \text{ МПа}$ для танкера в ходовом режиме.

Таблица

Результаты расчета ТНПУ для рассматриваемых ГД

Расчетный параметр, его обозначение и единицы измерения	Главный двигатель	
	6RTA52U-B	6S50ME-C8-ТII
Расход водяного пара (давление $P_{ВП} = 0,3 \text{ МПа}$) G_{s1} , кг/с (кг/ч)	0,207 (745,2)	0,131 (471,6)
Расход водяного пара (давление $P_{ВП} = 0,5 \text{ МПа}$) G_{s2} , кг/с (кг/ч)	0,5241 (1887)	0,3309 (1191)
Тепловая нагрузка на конденсатор Кд1 Q_1 , кВт	512	324
Тепловая нагрузка на конденсатор Кд2 Q_2 , кВт	1309	827
Массовый расход хладагента в ТНПУ G_0 , кг/с	16,23	10,25
Электрическая мощность на привод компрессоров Км1 и Км2 N_e , кВт	536	339
Расход топлива ВДГ на привод компрессоров $G_{ТДГ}$, кг/с (кг/ч)	0,02979 (107,2)	0,01881 (67,7)
Расход топлива ВК при получении водяного пара $G_{ТВК}$, кг/с (кг/ч)	0,0502 (181,8)	0,03170 (114,1)
Количество сэкономленного топлива при использовании ТНПУ $\Delta G_T = G_{ТВК} - G_{ТДГ}$, кг/ч (%)	73,3 (41)	46,4 (41)
Тепловой коэффициент ТНПУ COP	3,40	

Литература

1. Андреев, А. А. Экологическая и энергетическая целесообразность утилизации низкопотенциальной теплоты на судах с помощью теплового насоса [Текст] / А. А. Андреев, И. В. Калинин // Техногенна безпека : Наукові праці МДГУ ім. П. Могили. – Миколаїв : МДГУ, 2008. – Т. 85, Вип. 72. – С. 23–27.
2. Маслов, В. В. Утилизация теплоты судовых дизелей [Текст] / В. В. Маслов. – М. : Транспорт, 1990. – 144 с.
3. Оценка эффективности утилизации теплоты судовых главных дизелей теплоносными паропроизводящими установками [Текст] / Ю. В. Захаров, А. А. Андреев, И. В. Калинин, В. И. Максимов // Зб. наук. пр. НУК. – 2005. – № 2 (401). – С. 70–79.
4. Радченко, Н. И. Теплоутилизирующие контуры на низкокипящих рабочих телах для ДВС [Текст] / Н. И. Радченко, А. А. Сирота // Авіаційно-космічна техніка і технологія : Зб. наук. пр. Нац.

аерокосм. ун-та – Харків : ХАІ, 2002. – Вип. 31. Двигуни та енергоустановки. – С. 17–19.

5. Селиверстов, В. М. Утилизация тепла в судовых дизельных установках [Текст] / В. М. Селиверстов. – Л. : Судостроение, 1973. – 256 с.
6. Современное состояние систем глубокой утилизации вторичных энергоресурсов судовых дизельных энергетических установок [Текст] / А. А. Андреев, В. С. Самохвалов, Д. Н. Смагин, В. С. Цвиклис // Зб. наук. пр. УДМТУ. – Миколаїв : УДМТУ, 2002. – № 5 (283). – С. 66–76.
7. Танкер проекта 15966 "Григорий Нестеренко" [Текст] : Спецификация. – Херсон : ЦКБ "Изумруд", 1985. – 156 с.
8. Man Diesel & Turbo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mandieselturbo.com>. – 15.03.2014.
9. Wärtsilä [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wartsila.com>. – 15.03.2014.

Поступила в редакцию 14.03.2014, рассмотрена на редколлегии 11.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н. И. Радченко, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев.

ТЕПЛОВИЙ НАСОС В ЯКОСТІ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ СУДНОВОЇ ПАРОГЕНЕРУЮЧОЇ УСТАНОВКИ

І. В. Калініченко

Проаналізовано можливі джерела низькопотенційної теплоти судового головного дизеля з метою її утилізації теплонасосною паровиробляючою установкою. Проведено аналіз можливості забезпечення водяною парою судових споживачів на ходовому режимі судна при використанні теплонасосної паровиробляючої установки, що утилізує низькопотенційні вторинні теплові ресурси головного дизеля. Використання теплонасосної паровиробляючої установки в якості альтернативного джерела отримання водяної пари на судні дозволило б, по-перше, утилізувати теплоту дизеля, що скидається, зменшуючи тим самим теплове забруднення навколишнього середовища, по-друге, відмовитися від роботи допоміжного котла на ходовому режимі судна, а отже заощадити невідновлювані джерела енергії.

Ключові слова: теплонасосна паровиробляюча установка, робочий агент, головний дизель, низькопотенційна теплота, утилізація, водяна пара.

HEAT PUMP AS AN ALTERNATIVE MARINE STEAM GENERATING PLANT

I. V. Kalinichenko

The possible sources of low potential heat of main engine ship with a view to utilization of the heat pump steam producing plant is analyzed. The analysis of possibility of providing by the water steam of ship users in the working mode of ship at the use of heat pump steam producing plant to utilizing the low potential second thermal resources of main diesel engine is conducted. Using a heat pump steam producing plant as an alternative source obtain of water steam in the ship would, firstly, utilizing a discharged heat of diesel, thereby reducing thermal environmental pollution, and secondly, to refuse to work the auxiliary boiler on the navigation mode of the ship and therefore save non-renewable sources.

Keywords: the heat pump steam producing plant, working agent, main diesel, low potential heat, utilization, water steam.

Калініченко Іван Владимирович – преподаватель кафедры теплотехники, Херсонский филиал Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Херсон, Украина, e-mail: kalinichenkoi80@ukr.net.