

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ВТОРИЧНОЙ ТЕПЛОТЫ СУДОВЫХ ДВС ТЕПЛОНАСОСНОЙ ПАРПРОИЗВОДЯЩЕЙ УСТАНОВКОЙ

Андреев А.А., канд. техн. наук, доцент, Калининченко И.В., преподаватель
Национальный университет кораблестроения, Херсонский филиал

Проведен анализ возможности обеспечения водяным паром судовых потребителей на ходовом режиме судна при использовании теплонасосной паропроизводящей установки, утилизирующей низкопотенциальные вторичные тепловые ресурсы главного дизеля

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

Ключевые слова: теплонасосная паропроизводящая установка, низкопотенциальная теплота.

Актуальность проблемы. Задача утилизации вторичной теплоты судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с целью повышения эффективности комплексного использования топливно-энергетических ресурсов ставится и успешно решается уже достаточно давно. Однако на сегодняшний день ситуация качественно изменилась. Повышение КПД (снижение удельного расхода топлива) современных судовых дизелей сопровождается перераспределением статей их теплового баланса, в частности уменьшением потерь с отходящими газами (ОГ) ДВС при одновременном возрастании доли теплоты, отводимой в охладителе наддувочного воздуха. Также имеет место существенное снижение температуры ОГ. Эти факторы в совокупности резко понижают эффективность традиционных схем утилизации, в которых теплота ОГ используется для выработки водяного пара в утилизационном парогенераторе (УПГ) или подогрева термальной жидкости (thermal oil) в утилизационном подогревателе, а теплота охлаждающей воды частично срабатывается в водоопреснительной установке (ВОУ). Понижение теплового потенциала ОГ приводит для некоторых типов судов, в первую очередь танкеров, к недостаточной производительности УПГ и необходимости ввода в работу на ходовом режиме вспомогательного котла (ВК) [1].

Одним из перспективных путей решения этой проблемы является применение на судах теплонасосных паропроизводящих установок (ТНПУ), источником потребляемой низкопотенциальной теплоты (НПТ) в испарителе у которых являлась бы вода системы охлаждения дизеля. Полученный водяной пар давлением 0,3...0,9 МПа можно использовать, в частности, для подогрева груза на танкерах на ходовом режиме. Это позволило бы, во-первых, утилизировать сбрасываемую теплоту охлаждающей воды, уменьшая тем самым тепловое загрязнение окружающей среды, во-вторых, отказаться от работы ВК на ходовом режиме судна, а следовательно понизить загрязнение атмосферы токсичными компонентами уходящих дымовых газов и, в-третьих, сэкономить котельное топливо.

Анализ исследований по данной проблеме. Теплонасосное направление утилизации вторичных тепловых ресурсов как судовых, так и стационарных энергетических установок для производства водяного пара в научно-технической литературе ранее уже рассматривалось. Однако, анализ различных вариантов теплоутилизирующих контуров на низкокипящих рабочих телах (НРТ) для получения водяного пара, представленных в различных литературных источниках, показал, что приведенных данных недостаточно для оценки перспективности внедрения ТНПУ [2, 3]. Параметры работы ДВС приведены для устаревших моделей машин, не обоснован выбор НРТ, не произведены конструктивные расчеты основных машин и аппаратов, а также не обоснована рациональность использования ТНПУ на различных режимах работы ДВС.

Постановка задачи. Недостаточность достоверной информации и определила цель проведенного исследования, результаты которого нашли отражение в данной статье: провести анализ возможности обеспечения водяным паром судовых потребителей в ходовом режиме при использовании ТНПУ.

Изложение материала исследования. Первоначально с целью оценки областей предпочтительного использования ТНПУ с электроприводом авторами был произведен сравнительный анализ энергетических характеристик различных судовых паропроизводящих установок: теплонасосных и вспомогательных котельных [4]. В качестве критерия их сравнительной эффективности был выбран эксергетический КПД. Анализ полученных зависимостей для ТНПУ (рис. 1) и сравнение их с данными по ВК позволили сделать вывод, что одноступенчатая ТНПУ с электроприводом не имеет энергетических преимуществ

относительно лучших образцов судовых ВК, а двухступенчатая ТНПУ по эксергетическим показателям предпочтительней ВК при давлениях генерируемого насыщенного водяного пара до 0,6 МПа.

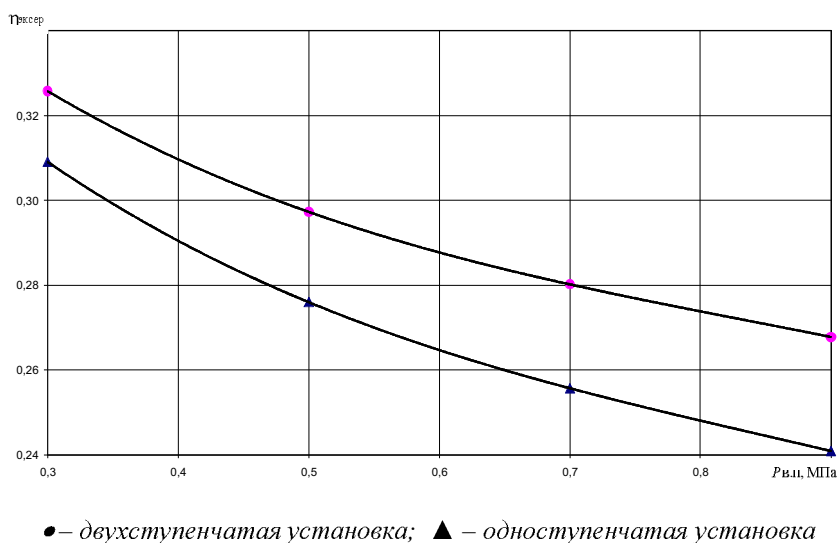


Рис. 1 – Зависимость эксергетического КПД теплонасосной паропроизводящей установки от давления вырабатываемого насыщенного водяного пара

С учетом этого, были разработаны и защищены патентами [5, 6] принципиальные схемы многоступенчатых ТНПУ с получением насыщенного водяного пара трех давлений (0,3, 0,5 и 0,9 МПа). Однако, учитывая возможность термического разложения хладонов, являющихся рабочим телом ТНПУ, и с целью упрощения установки для дальнейших исследований была принята двухступенчатая схема согласно рис. 2, предназначенная для производства пара давлением 0,3 и 0,5 МПа. При этом предполагалось, что водяной пар давлением 0,8...0,9 МПа вырабатывается в традиционном УПГ за счет теплоты ОГ главного двигателя (ГД) судна. Установка работает следующим образом. Рабочий агент ТНПУ кипит в испарителе И, отбирая НПТ системы охлаждения ДВС. Далее он сжимается до промежуточного давления в компрессоре первой ступени Км1 и разделяется на два потока. Первый поток конденсируется в конденсаторе Кд1, являющемся генератором водяного пара низкого давления (0,3 МПа), и в жидком состоянии поступает в промежуточный сосуд ПС. Туда же поступает и второй поток пара НРТ промежуточного давления после компрессора первой ступени Км1. Из промежуточного сосуда ПС пар НРТ поступает на всасывание в компрессор второй ступени Км2. После сжатия в нем НРТ конденсируется в конденсаторе Кд2, который является генератором водяного пара среднего давления (0,5 МПа). Далее жидкий НРТ высокого давления охлаждается в змеевике промежуточного сосуда ПС, дросселируется в дроссельном клапане ДК и опять при низком давлении подается на вход в испаритель И.

Изображение процессов в цикле ТНПУ представлено на рис. 3.

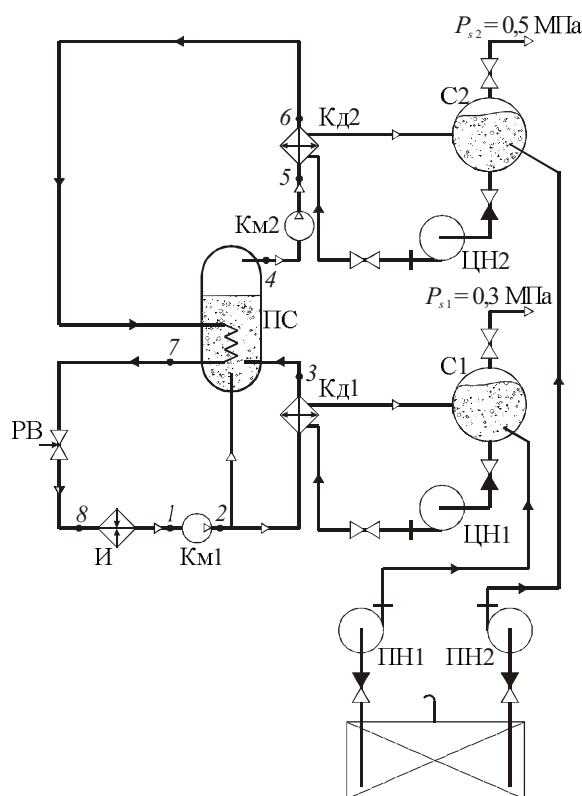
Было выполнено расчетное исследование данной схемы ТНПУ на различных НРТ [7]. В качестве источника НПТ был выбран высокотемпературный контур системы охлаждения пресной водой малооборотного супердлинноходного дизеля 5RTA58T-B фирмы «Wartsila-NSD» (Финляндия) полной (номинальной) мощностью $Ne_{ном}^{ГД} = 10625$ кВт. По данным каталогов тепловая нагрузка на испаритель ТНПУ составит $Q_0 = 3605$ кВт. При этом температура охлаждающей пресной воды на входе и на выходе из испарителя должна поддерживаться соответственно 85 °С и 70 °С. Для производства водяного пара необходимых параметров давления конденсации НРТ принимались для первой и второй ступеней соответственно 144 °С и 162 °С.

При выборе рабочего тела ТНПУ рассматривались НРТ, отвечающие следующим требованиям:

— отсутствие вакуума в системе для предотвращения подсоса воздуха и, соответственно, установки сложного оборудования, отделяющего воздух от НРТ. Для этого следует использовать такие НРТ, у которых давление кипения в испарителе больше или равно атмосферному давлению, то есть нормальная температура кипения НРТ должна быть меньше или равна температуре кипения в испарителе;

— осуществимость процесса конденсации НРТ в конденсаторе Кд2, что достигается в случае, если критическая температура хладагента больше температуры его конденсации в конденсаторе Кд2;

— озонобезопасность, что обеспечивается использованием таких НРТ, у которых молекулы не содержат атомов брома, а также атомов хлора без атомов водорода.



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

Рис. 2 – Принципиальная схема теплонасосной паропроизводящей установки двух давлений

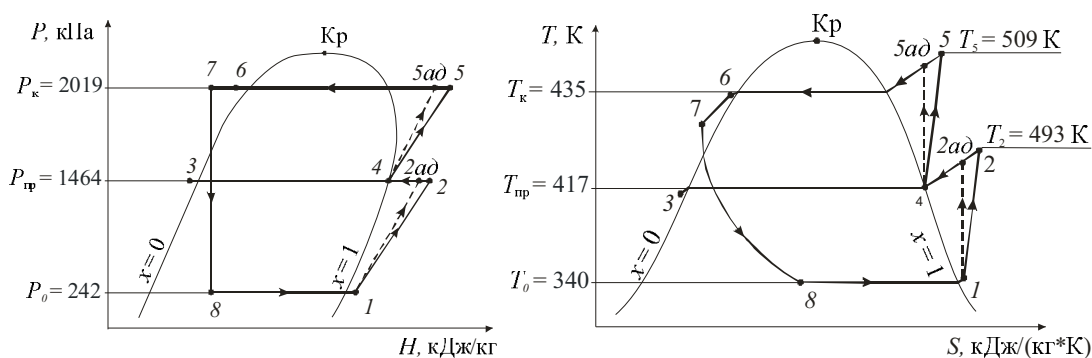


Рис. 3 – Цикл теплонасосной паропроизводящей установки в тепловых $H-P$ и $S-T$ -диаграммах состояния вещества (значения температур и давлений в характерных точках цикла приведены для хладагона R30)

Анализ эффективности применения различных НРТ (табл. 1) показал следующее. Хладоны R21 (CHFCl_2), R123 (CF_3CHCl_2), R160 (CH_2ClCH_3) имеют по сравнению с другими рассматриваемыми веществами высокое давление конденсации (желательно, чтобы оно не превышало 2,1 МПа, иначе это ведет к чрезмерному утолщению стенок трубопроводов, повышенной прочности корпуса компрессора и конденсатора, что вызывает их удорожание и т.д.); недостатком хладонов R123 и R4(13)0 (C_3H_2) является самое низкое значение коэффициента преобразования $\text{COP} < 2,0$. Для хладонов R21, R123 и R4(13)0 характерны высокие значения массовых расходов в цикле (больше 25 кг/с), что приводит к повышенным массогабаритным и стоимостным показателям машин, аппаратов и трубопроводов установки. Хладоны R20 (CHCl_3), R30 (CH_2Cl_2) и R280 ($\text{C}_3\text{H}_7\text{Cl}$) имеют примерно одинаковые отношения давлений в ступенях,

удовлетворительные значения давлений кипения и конденсации, а также близкие значения COP (2,6...2,8). Однако эти НРТ относятся к так называемым гидрохлоруглеводородным хладагентам (ГХУ) и характеризуются одними из худших экологических показателей среди рассматриваемой группы веществ (например, хладон R30 имеет потенциал озонового истощения ODP, равный 1,0). Таким образом, для оптимального выбора НРТ в каждом конкретном случае необходимо в дальнейшем разработать методику комплексной оценки эффективности ТНПУ, учитывающей энергетические, массогабаритные, эксплуатационные и экологические показатели работы установки.

Таблица 1 – Результаты расчета цикла ТНПУ на различных НРТ

Показатель работы установки, единица измерения	Марка НРТ						
	R20	R21	R30	R123	R160	R280	R4(13)0
Давления НРТ, кПа:							
кипения;	122	625	242	349	562	195	264
промежуточное;	850	2996	1464	1892	2743	1183	1444
конденсации	1199	4013	2019	2581	3678	1633	1967
Массовые расходы НРТ, кг/с, через:							
испаритель;	23,63	39,43	18,33	78,55	23,84	22,53	47,72
конденсатор Кд1	1,08	1,45	0,82	2,34	0,91	0,91	1,22
Отношение давлений ступеней:							
первой;	6,95	4,79	6,05	5,41	4,88	6,08	5,47
второй	1,41	1,34	1,38	1,36	1,34	1,38	1,79
Мощности привода компрессора ступени, кВт:							
первой;	1650	2342	1757	3084	2236	2014	3880
второй	350	455	378	576	422	303	959
Тепловая нагрузка на конденсатор второй ступени, кВт	5373	6151	5496	7023	6019	6573	9623
Расход насыщенного водяного пара среднего давления, кг/с	2,06	2,36	2,11	2,70	2,31	2,18	3,69
Коэффициент преобразования теплоты COP	2,82	2,29	2,70	1,99	2,26	2,56	1,59

В дальнейшем было проведено расчетное исследование для оценки эффективности работы ТНПУ в составе судовой энергетической установки конкретного судна. Как судно-прототип 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, необходимом для подогрева топлива судовых ДВС и перевозимого груза, а также для функционирования различных общесудовых систем. Согласно судовой спецификации на танкере установлены: ГД марки 6ДКРН 60/195-10 полной (номинальной) мощностью $Ne_{nom}^{ГД} = 9370$ кВт; ВК марки КАВ 6,3/7 паропроизводительностью $D_{ВК1} = 6,3$ т/ч и ВК марки КАВ 16/16 паропроизводительностью $D_{ВК2} = 16$ т/ч; УПГ марки КУП 660 паропроизводительностью $D_{УК} = 5,4$ т/ч; три вспомогательных дизель-генератора (ВДГ) марки KRG-6 фирмы «Bergen Diesel» мощностью по $Ne_{nom}^{ВДГ} = 880$ кВт; ВОУ марки Д5-У производительностью по пресной воде 20...25 т/сутки. Численность экипажа — $z_{эк} = 24$ человека.

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. В качестве ГД танкера рассматривались современные малооборотные супердлинноходные дизели: 6RTA52U-B фирмы «Wartsila-NSD» полной (номинальной) мощностью $Ne_{nom}^{ГД} = 9600$ кВт и 6S50ME-C8-TH фирмы «MAN B&W» (Дания) мощностью $Ne_{nom}^{ГД} = 9960$ кВт. Для каждого из дизелей был проведен анализ возможных источников НПТ в системе охлаждения ДВС, показавший, что наибольший температурный потенциал среди источников НПТ имеет пресная вода, охлаждающая рубашки цилиндров (температура на выходе из дизеля 80...85 °С). Это делает её наиболее предпочтительным источником НПТ для работы ТНПУ.

Для оценки возможного количества НПТ необходимо определить количество дистиллята, вырабатываемого в ВОУ, которое требуется для пополнения судовых запасов пресной воды (зависит от численности экипажа судна, производительности котельных установок, мощности ГД и ВДГ, а также от количест-

ва сепараторов топлива и масла). Расчет показал, что для данного судна это количество дистиллята ориентировочно составит 22,28 т/сутки. Это значение соответствует производительности установленной на судне-прототипе ВОУ марки Д5-У, равной, как уже отмечалось ранее, 25 т/сутки.

С учетом количества теплоты, отбираемой для работы ВОУ от пресной воды системы охлаждения рубашек цилиндров ДВС, избыток теплоты, которая может быть использована в качестве источника НПП для ТНПУ, составит:

- для двигателя 6RTA52U-B $Q_0 = Q_{ХРЦ} - Q_{ВОУ} = 1862 - 743 = 1119$ кВт;
- для двигателя 6S50ME-C8-ТII $Q_0 = Q_{ХРЦ} - Q_{ВОУ} = 1450 - 743 = 707$ кВт.

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, освоенность промышленностью и др.) и экологических характеристик (разрешенность к использованию Монреальским, Киотским и другими международными протоколами и конвенциями, нетоксичность и др.). В результате для расчетов циклов ТНПУ был выбран хладагент R123, который относится гидрохлорфторуглеродным хладагентам (ГХФУ) 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: 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, представленной на рис. 2, принималось, что расход G_1 НРТ через конденсатор нижней ступени Кд1 составляет 30 % общего его расхода G_0 в системе. Также задавались следующие исходные данные: температура питательной воды $t_w = 60$ °С; адиабатный КПД компрессора на НРТ $\eta_{ад} = 0,82$; КПД ВК $\eta_{ВК} = 0,85$; удельный расход топлива ВДГ $g_e = 0,2$ кг/(кВт·ч). При сравнении расхода топлива в ВДГ и ВК величина низшей удельной теплоты сгорания топлива Q_p^h была приравнена к значению для стандартного (условного) топлива.

Результаты расчета интегральных показателей ТНПУ для рассматриваемых ГД танкера проекта 15966, представленные в табл. 2, показали несомненные энергетические преимущества от установки ТНПУ на судне.

Таблица 2 – Результаты расчета ТНПУ для рассматриваемых ГД

Расчетный параметр, его обозначение и единицы измерения	Главный двигатель	
	6RTA52U-B	6S50ME-C8-ТII
Расход водяного пара (давление $P_{ВП} = 0,3$ МПа) G_{s1} , кг/с (кг/ч)	0,26 (936)	0,144 (518,4)
Расход водяного пара (давление $P_{ВП} = 0,5$ МПа) G_{s2} , кг/с (кг/ч)	0,5873 (2114)	0,4033 (1452)
Тепловая нагрузка на конденсатор Кд1 Q_1 , кВт	644	356
Тепловая нагрузка на конденсатор Кд2 Q_2 , кВт	1467	1008
Массовый расход хладагента в ТНПУ G_0 , кг/с	17,1	11,3
Электрическая мощность на привод компрессоров Км1 и Км2 N_e , кВт	756	540
Расход топлива ВДГ для выработки электроэнергии на привод компрессоров $G_{ТДГ}$, кг/с (кг/ч)	0,04202 (151,3)	0,0300 (108,0)
Расход топлива ВК при получении водяного пара тех же параметров, что и ТНПУ, $G_{ТВК}$, кг/с (кг/ч)	0,05812 (209)	0,03756 (135)
Количество сэкономленного топлива при использовании ТНПУ $\Delta G_T = G_{ТВК} - G_{ТДГ}$, кг/ч (%)	58 (27,7)	27 (20,1)
Тепловой коэффициент ТНПУ COP	2,8	2,5

К следующим задачам, требующим своего решения для обоснованной оценки перспективности внедрения ТНПУ на судах, можно отнести:

- определение массогабаритных и стоимостных показателей элементов ТНПУ;
- оптимизационные расчеты для нахождения наиболее эффективных схем, НРТ, параметров работы ТНПУ;
- оценка возможности работы ТНПУ при режимах работы ГД, отличных от номинального.

Выводы

1. Наиболее предпочтительным источником НПТ для работы ТНПУ является пресная вода, охлаждающая рубашки цилиндров ГД, имеющая температуру на выходе из дизеля 80...85 °С. 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...0,5 МПа для танкера в ходовом режиме.

Литература

1. Современное состояние систем глубокой утилизации вторичных энергоресурсов судовых дизельных энергетических установок/ А.А. Андреев, В.С. Самохвалов, Д.Н. Смагин, В.С. Цвиклис // Зб. наук. пр. УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – № 5 (283). – С. 66-76.
2. Андреев А.А., Калиниченко И.В. Эколого-энергетические аспекты внедрения на судах теплонасосных паропроизводящих установок// Наукові праці: Науково-методичний журнал. Т. 61. Вип. 48. Техногенна безпека. – Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. П. Могили, 2007. – С. 46-52.
3. Андреев А.А. Теплонасосное направление генерирования водяного пара в промышленной энергетике // Промышленная теплотехника. – 2007. – т. 29, № 4. – С. 73-77.
4. Андреев А.А., Калиниченко И.В. Сравнительная оценка энергетической эффективности судовых паропроизводящих установок различных типов// Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв: НУК, 2007. – № 2 (413). – С. 100-106.
5. Патент на корисну модель № 27941, Україна, МПК F22B3/00, F25B30/00. Спосіб утилізації низькопотенційної теплоти теплонасосним парогенератором/ Андреев А.А., Калініченко І.В.; Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – Заявл. 15.05.2007; Опубл. 26.11.2007. – Бюл. № 19.
6. Патент на корисну модель № 29056, Україна, МПК F22B 3/00, F25B 30/00. Спосіб утилізації низькопотенційної теплоти теплонасосним парогенератором/ Андреев А.А., Калініченко І.В.; Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – Заявл. 29.05.2007; Опубл. 10.01.2008.
7. Оценка эффективности утилизации теплоты судовых главных дизелей теплонасосными паропроизводящими установками/ Ю.В. Захаров, А.А. Андреев, И.В. Калиниченко, В.И. Максимов// Зб. наук. пр. НУК. – 2005. – № 2 (401). – С. 70-79.

УДК 621.57

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛООБМІННИКІВ ТЕПЛОВИКОРИСТОВУЮЧОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ

Андреев А.А., асистент, Коновалов Д.В., канд. техн. наук, доцент,
Радченко М.І., д-р техн. наук, професор
Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

Наведено основні положення математичної моделі теплообмінників тепловикористовуючої системи охолодження наддувного повітря суднових малооборотових дизелів. Показано особливості та переваги математичної моделі.

The basic principles of the mathematical model of heat exchangers in the waste heat recovery scavenge air cooling system of marine low speed diesel engines are presented. The particularities and advantages of the mathematical model have been shown

Ключові слова: теплообмінник, випаровування, утилізація теплоти, наддувне повітря, система охолодження.

1. Стан проблеми, невирішені питання, мета дослідження. Охолодження наддувного повітря двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) застосовують для досягнення двох цілей: підвищення потужності та зниження теплового навантаження деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ) двигуна. Охолодження повітря збільшує його густину, відповідно і масу заряду циліндра двигуна. Збільшення маси заряду повітря в циліндрі дозволяє спалювати більшу кількість палива і виконати основну задачу системи наддувно-