

REFERENCES

1. Pronin, E. N. *Ispolzovanie szhizhennogo prirodnogo gaza na vodnom transporte*. SPb., 2016.
2. "Fraht dlja SPG-tankerov predelno snizilsja." *Morskije vesti Rossii* 8 (2016): 1.
3. Kostylev, I. I., M. K. Ovsjannikov, E. G. Orlova, and N. E. Sivcov. *Teplotehnicheskij aspekt morskikh perevozok szhizhennogo gaza*. SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S.O. Makarova, 2002.
4. Kostylev, I. I., and M. K. Ovsjannikov. *Morskaja transportirovka szhizhennogo gaza: ucheb.-teoret. izd.* SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S.O. Makarova, 2009.
5. Shurpjak, V. K., and V. V. Grishkin. "O konstruktivnom kojefficiente jenergeticheskoj jeffektivnosti sudov ledovogo plavanija." *Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 36 (2013): 191–212.
6. Khalilov, Nuriy Akkievich, and Nina Andreevna Strakhova. "Operation experience of ship dual-fuel diesels." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2011): 124–127.
7. Krestjancev, A., and A. Luckevich. "Snabzhenie potrebitelej jenergonositeljami v zamerzajushhij morjah RF: kompleksnyj podhod." *Morskoj flot* 3 (2016): 38–46.
8. Krestjancev, A. "Bunkerovka SPG: v poiskah optimalnogo reshenija." *Morskoj flot* 2 (2013): 36–39.
9. «Gazprom» i Mitsui podpisali memorandum po issledovanijam v oblasti SPG-bunkerovki. Web. 22 Aug. 2016 <portnews.ru/top_news/print/225594>.
10. Semenjuk, A. V., S. A. Garmash, and L. A. Semenjuk. "Jekspluatacionnye rezhimy paroturbinnij ustanovki morskogo gazovoza." *Morskije intellektualnye tehnologii* 1.1(19) (2013): 45–47.
11. Hljupin, L. A. "Mooring facilities for refueling of vessels liquefied natural gas." *Vestnik Gosudarstvenno universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 125–128.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Костылев Иван Иванович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kostylevii@gumrf.ru
Коняев Дмитрий Викторович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_tckvu@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kostylev Ivan Ivanovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kostylevii@gumrf.ru
Konjaev Dmitrij Viktorovich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_tckvu@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 23 августа 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-144-150
УДК 629.12.002 + 620.9

**А. В. Вольнцев,
А. Н. Соболенко**

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕСУРСОВ ГЛАВНОГО СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСРЕДСТВОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрена возможность использования теплового насоса и теплообменного аппарата в системе отопления судна. Эффективное замещение в топливном балансе систем судового теплоснабжения ископаемых видов топлива на практически неисчерпаемые ресурсы низкопотенциального тепла возобновляемых и вторичных источников с использованием теплонасосной установки является актуальным направлением энергосбережения и охраны окружающей среды. Показан принцип работы теплонасосной установки, утилизирующей низкопотенциальные вторичные тепловые ресурсы главного двигателя. Особенностью использования теплового насоса является то, что источник вторичной теплоты имеет более

высокую температуру, чем потребитель. Энергетическая эффективность главных судовых установок может быть повышена более полной утилизацией вторичных энергоресурсов за счет применения тепловых насосов. Проведен анализ возможности обеспечения теплом судовых потребителей на ходовом режиме судна при использовании теплонасосной установки, утилизирующей низкопотенциальные вторичные тепловые ресурсы главного двигателя. Предложенный вариант применения теплонасосной установки в качестве альтернативного источника получения тепла 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 и, возможно, стояночном режимах судна, а, следовательно, сэкономить невозобновляемые источники энергии. Доказано, что внедрение теплонасосных систем теплохолодоснабжения является весьма эффективным инструментом энергосбережения для судов морского флота, позволяющим не только обеспечить экономию энергоресурсов у потребителя, но и существенным образом снизить нагрузку на централизованную систему энергосбережения судна, а также сократить выбросы в окружающую атмосферу продуктов сгорания традиционного органического топлива.

Ключевые слова: тепловой насос, хладагент, главный двигатель, низкопотенциальная теплота, отходы теплоты.

Введение

В условиях наметившейся переориентации теплоэнергетического хозяйства страны на развитие низкотемпературных централизованных и смешанных систем теплоснабжения роль тепловых насосов возрастает, что требует разработки новых научно обоснованных подходов к их широкому применению в различных областях. Эффективное замещение в топливном балансе систем судового теплоснабжения ископаемых видов топлива на практически неисчерпаемые ресурсы низкопотенциального тепла возобновляемых и вторичных источников с использованием теплового насоса является актуальным направлением энергосбережения и охраны окружающей среды. Тепловая мощность действующего в мире парка тепловых насосов различного типа оценивается в 250 ГВт с годовой выработкой теплоты 1,0 млрд Гкал, что соответствует замещению органического топлива в объеме до 80 млн т в год. По прогнозам Мирового энергетического комитета, к 2020 г. 75 % всех систем теплоснабжения в развитых странах будут использовать тепловой насос. В России установленная мощность тепловых насосов с конца 80-х гг. XX в. по настоящее время не превышает 65 МВт, что явно не соответствует потенциальным возможностям применения этой технологии в условиях наметившейся ориентации национальной экономики на энергосбережение [1].

Обрабатывающие суда и значительная часть добывающих судов для переработки морепродуктов оснащены мощными вспомогательными котлами и электростанциями и только немногие из них имеют утилизационные котлы. Так, количество добывающих судов водоизмещением более 1000 т, оборудованных утилизационными паровыми котлами, в настоящее время составляет всего около 2 % от общего их числа. Кроме того, из-за высокой энерговооруженности добывающих судов возникают затруднения с размещением утилизационных котлов на ограниченной площади машинно-котельных отделений. При использовании теплового насоса возможен отказ от работы вспомогательной котельной установки на ходовом и, возможно, стояночном режимах судна, а, следовательно, есть возможность снизить загрязнение окружающей среды токсичными компонентами и сэкономить невозобновляемые источники энергии [2].

Утилизация вторичных тепловых ресурсов судового главного двигателя традиционно является одной из основных технологий повышения эффективности комплексного использования топлива для судовых энергетических установок. Теоретические исследования и разработки систем повторного использования теплоты главного двигателя (ГД), в первую очередь судовых дизельных установок, были успешно реализованы на большом числе морских судов. Однако на сегодняшний день ситуация с утилизацией теплоты судовых дизельных установок на промышленном и морском транспорте качественно изменилась. Повышение коэффициента полезного действия ГД (КПД современных малооборотных судовых ГД составляет 48 – 51 %), и снижение удельного расхода то-

плива современных судовых дизелей сопровождается перераспределением статей их теплового баланса (в частности, уменьшением потерь с выпускными газами и снижением температуры при одновременном возрастании доли теплоты, отводимой в охладителе наддувочного воздуха [3]). Эти факторы в совокупности резко снижают эффективность традиционных схем утилизации теплоты. Становится затруднительным одновременное обеспечение паром как подогревателей различных сред на судне (перечень основных потребителей тепловой энергии и требуемые ее температурные уровни приведены в таблице), так и утилизационного турбогенератора, что приводит к необходимости ввода в работу вспомогательного парового котла.

Температурные уровни греющих и нагреваемых сред для судового оборудования

Потребитель теплоты	Температура подогреваемой среды, °С	Температура греющей среды, °С	Греющая среда	Давление пара, МПа
1. Подогреватель тяжёлого топлива ГД	150	170 ... 180	Пар	0,8
2. Система отопления, зимнего кондиционирования, подогревателя воздуха	20 ... 40	70 ... 140	Вода, пар	До 0,4
3. Хозяйственно-бытовые нужды	–	70 ... 140	Вода, пар	До 0,4
4. Абсорбционно-холодильные установки	–	80 ... 140	Вода, пар	До 0,4
5. Подогрев груза для судов типа танкер (нефть)	40 ... 70	80 ... 140	Вода, пар	До 0,4
6. Система обогрева цистерн топлива, масла, пропаривания кингстонных ящиков, подогреватели воды	50 ... 80	80 ... 110	Вода, пар	До 0,2
7. Опреснители воды	–	55 ... 70	Вода	–

Основная часть

Вспомогательные судовые паровые котлы служат для обеспечения паром вспомогательных механизмов, отопления помещений, где в качестве ГД установлены двигатели внутреннего сгорания. Вариантом решения этой проблемы может рассматриваться применение на судах теплонасосных паропроизводящих установок для выработки водяного пара, у которых источником потребляемой теплоты низкого потенциала (в испарителе) являлись бы вторичные тепловые ресурсы ГД. Это позволило бы, во-первых, утилизировать сбрасываемую теплоту, уменьшая тем самым тепловое загрязнение окружающей среды и, во-вторых, отказаться от работы вспомогательного котла на ходовом режиме судна, а, следовательно, экономить невозобновляемые источники энергии (котельное топливо) [4].

Направление утилизации вторичных тепловых ресурсов судовой дизельной установки для производства водяного пара посредством использования теплонасосной паропроизводящей установки в научно-технической литературе ранее уже рассматривалось [5]. Представлена схема работы теплонасосной установки (ТНУ) теплоутилизующего контура на низкокипящих рабочих телах (рис. 1) для получения водяного пара давлением 0,2 МПа и выше за счет теплоты наддувочного воздуха и охлаждающей воды ГД. Теплообменники *И1* и *И2* здесь являются испарителями теплового насоса, а образование водяного пара происходит в конденсаторах (*Кд*). При этом возможна компрессорная (см. рис. 1, *а*) или комбинированная эжекторно-компрессорная ТНУ (см. рис. 1, *б*). В первом случае в качестве рабочего тела ТНУ использовались высококипящие жидкости (например, хладон R114), во втором — хладон R22, так как R114 и R22 попадают под ограничения, накладываемые Монреальским протоколом [6]. Требования по защите окружающей среды и

энергетической безопасности мотивируют к использованию низкотемпературного тепла. Это позволит уменьшить зависимость от добываемого топлива. Для более эффективной работы ТНУ предлагается использовать хладоны R-410A, R-407C, R-134a, R-1336mzz (Z), которые используются в водогрейных тепловых насосах. Хладон R-1336mzz (Z) (МЕТИЛАЛЬ) является негорючим, он стабилен при высоких значениях температуры, несмотря на его ненасыщенную химическую структуру, возможно, из-за стабилизации двойной связи в результате сильной электроотрицательности группы CF₃ [7].

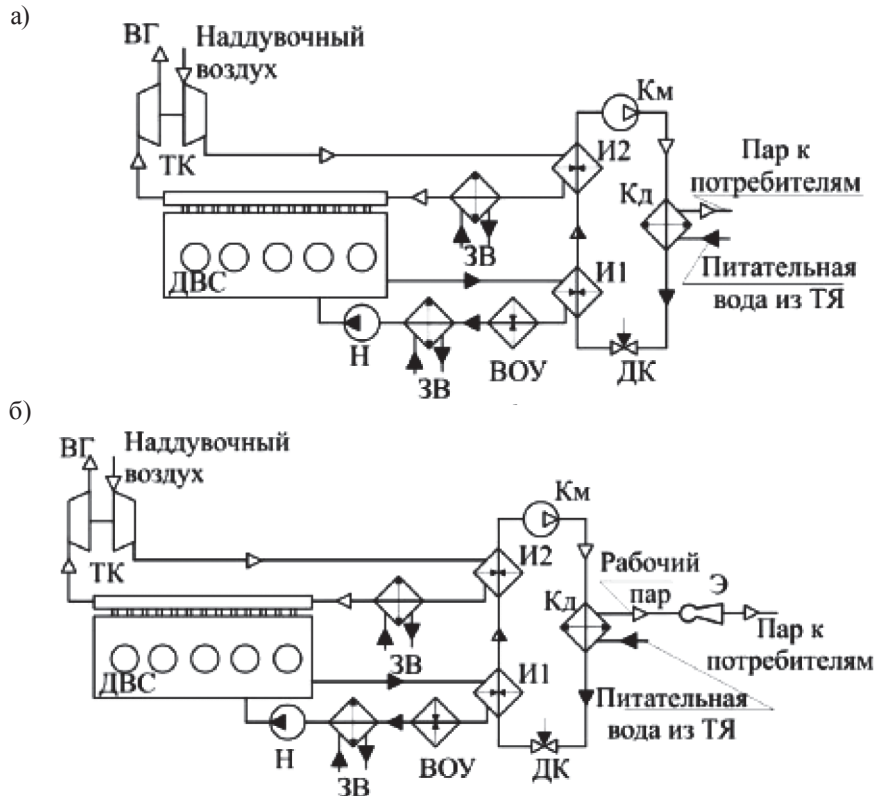


Рис. 1. Схемы теплоутилизирующих контуров для получения водяного пара:
 а — компрессорный контур; б — комбинированный эжекторно-компрессорный контур;
 ВГ — выхлопные газы; ТК — турбокомпрессор; ЗВ — забортная вода; И1, И2 — испарители;
 Км — компрессор теплового насоса; Кд — конденсатор; ТЯ — теплый ящик; Э — эжектор;
 ДК — дроссельный клапан; ВОУ — водоопреснительная установка;
 Н — насос; ДВС — двигатель внутреннего сгорания

Целью исследования является определение целесообразных путей и технической возможности обеспечения водяным паром судовых потребителей в ходовом режиме при использовании теплонасосной паропроизводящей установки. Выбор параметров работы теплонасосной установки определяется, с одной стороны, параметрами охлаждающей воды двигателя внутреннего сгорания, являющейся источником низкопотенциального тепла, а с другой — наличием на судне потребителей пара, в первую очередь, подогревателей груза. Анализ параметров пятидесяти двух судовых потребителей тепловой энергии показывает, что они могут быть разделены на три основные группы: первая группа — судовые потребители, использующие водяной пар низкого (0,3 МПа), вторая группа — судовые потребители, использующие водяной пар среднего (0,5 МПа) и третья группа — судовые потребители, использующие водяной пар высокого (до 0,9 МПа) давления [8]. Первоначально рассматривалась работа теплонасосной установки с получением пара всех трех параметров. Однако, учитывая возможность термического разложения хладонов, являющихся рабочим телом теплонасосной установки, а также с целью упрощения установки окончательно была принята схема (рис. 2). При этом предполагалось, что водяной

пар давлением 0,9 МПа вырабатывается в традиционном утилизирующем водяном котле (рис. 2) за счет теплоты отводимых газов главного судового двигателя [9].

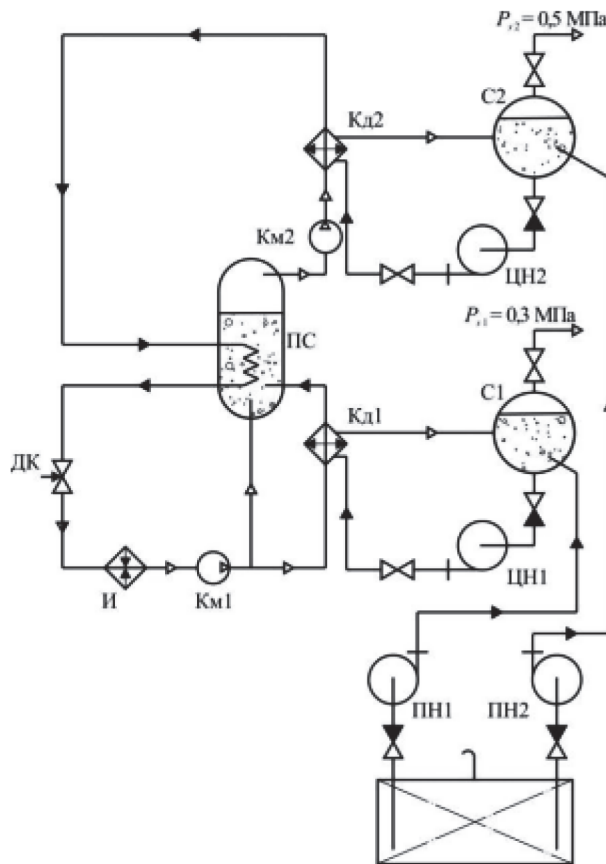


Рис. 2. Принципиальная схема теплонасосной паропроизводящей установки двух давлений с использованием водяного котла (цифры 1 и 2 в конце обозначений соответствуют аппаратам первой и второй ступени): ДК — дроссельный клапан; И — испаритель; Кд — конденсатор; Км — компрессор; ПН — водяной питательный насос;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

Наибольший температурный потенциал среди источников низкопотенциального тепла имеет пресная вода, охлаждающая втулки цилиндров. Это делает её наиболее предпочтительным источником низкопотенциального тепла для работы теплонасосной установки. Схема совместного подключения к этой системе водоопреснительной установки и теплонасосной установки для утилизации теплоты приведена на рис. 3 [10].

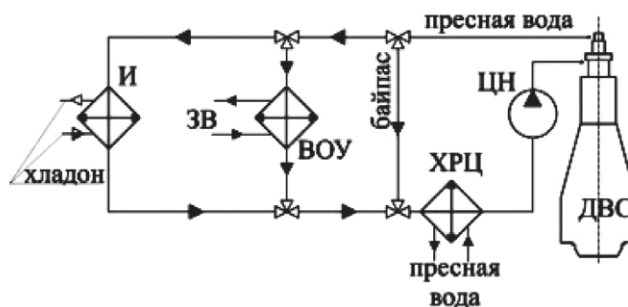


Рис. 3. Схема подключения испарителя теплонасосной установки, к системе охлаждения главного двигателя: И — испаритель теплового насоса; ЗВ — забортная вода; ВОУ — водоопреснительная установка; ХРЦ — холодильник системы охлаждения рубашки цилиндров ДВС; ЦН — циркуляционный насос

Выводы

1. Наиболее предпочтительным источником утилизации тепловых ресурсов главного судового двигателя (низкопотенциального тепла) для работы теплонасосной установки является пресная вода, охлаждающая рубашки цилиндров ГД, имеющая температуру на выходе из дизеля 80 ... 85 °С. Количество теплоты этого источника является достаточным для одновременной работы ТНПУ и ВОУ.

2. Применение теплонасосной установки на морских судах оправдывает использование теплового эффекта как первичного агента для нагрева помещения, воды, рабочих и технических жидкостей (мазут, дизельное топливо и т. д.), так и вторичного как холодильного агента для охлаждения рабочих, производственных и бытовых помещений личного состава, а также для охлаждения продуктов питания и отвода тепла паропроизводящей установки от рабочих жидкостей двигателя внутреннего сгорания. Благодаря образуемому конденсату возможно получение дистиллированной воды.

3. Внедрение теплонасосных систем теплохолодоснабжения является весьма эффективным инструментом политики энергосбережения для судов промыслового и морского флота, позволяющим не только обеспечить экономию энергоресурсов у потребителя, но и существенным образом снизить нагрузку на централизованную систему энергосбережения судна, а также сократить выбросы в окружающую атмосферу продуктов сгорания традиционного органического топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Елистратов С. Л.* Комплексное исследование теплонасосных установок: диссертация / С. Л. Елистратов. — Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе, 2010. — 383 с.
2. *Соболенко А. Н.* Судовые энергетические установки: дипломное проектирование / А. Н. Соболенко, Р. Р. Симашов. — М.: Моркнига, 2015. — Ч. 2. — 426 с.
3. *Андреев А. А.* 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. — 2002. — № 5 (283). — С. 66–76.
4. *Калиниченко И. В.* Теплонасосное направление утилизации вторичных тепловых ресурсов судовой энергетической установки / И. В. Калиниченко, А. А. Андреев // Науковий вісник ХДМІ. — 2009. — № 1 (1). — С. 174–183.
5. *Радченко Н. И.* Теплоутилизирующие контуры на низкокипящих рабочих телах для ДВС / Н. И. Радченко, А. А. Сирота // Авіаційно-космічна техніка і технологія. — 2002. — Вип. 31. — С. 17–19.
6. Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/montreal_prot.shtml (дата обращения – 10.09.16)
7. *Kontomaris K.* Global Technology Leader – Working Fluids & Foam Expansion Agents / K. Kontomaris / IEA Heat Pump Centre Newsletter. — 2016. — Volume 34. — No. 1/2016 (39). — Pp. 4–5.
8. *Андреев А. А.* Оценка эффективности утилизации теплоты судовых главных дизелей теплонасосными паропроизводящими установками / А. А. Андреев, Ю. В. Захаров, И. В. Калиниченко, В. И. Максимов // Зб. наук. пр. УДМТУ. — 2005. — № 2 (401). — С. 70–79.
9. *Калиниченко И. В.* Получение пара на судне тепловым насосом. / И. В. Калиниченко, А. А. Андреев, Н. Б. Андреева // Водный транспорт. — 2015. — № 2 (23). — С. 48–57.
10. *Волынцев А. В.* Теплонасосная установка для использования на судах промыслового флота / А. В. Волынцев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2015. — № 4. — С. 121–125.

UTILIZATION OF MAIN SHIP ENGINE HEAT RESOURCES BY MEANS OF HEAT PUMP INSTALLATION USAGE

The possibility of using a heat pump and a heat exchanger in a heating vessel. Effective substitution in fuel balance of marine heating systems on fossil fuels is practically inexhaustible resources of low-grade heat of renewable and secondary sources of heat using a topical trend of energy saving and environmental protection.

Shows the principle of the heat pump system dispose of low-potential secondary thermal resources of the main engine. A feature of the heat pump is that a secondary source of heat has a higher temperature than the consumer. Energy efficiency of main marine plants can be increased more complete utilization of secondary energy resources through the use of heat pumps. The analysis of the possibility of providing heat to the consumers of marine vessel navigating mode when using the heat pump system, heat-utilizing low-potential secondary resources of the main engine. The proposed variant of the use of the heat pump system as an alternative source of heat on the ship would have allowed, first, to dispose of the discharged heat of the diesel, thus reducing thermal pollution of the environment, and secondly, to abandon the operation of the auxiliary boiler on the navigation mode, and possibly parking modes of the vessel and, thus saving non-renewable sources of energy. It is proved that the introduction of heat pump heating and cooling system is extremely effective energy-saving tool for Navy ships, which allows not only to provide energy savings at the consumer, but also the sous-nificant way to reduce the burden on centralized energy saving system of the vessel, as well as to reduce emissions to the ambient atmosphere of the combustion of traditional products fossil fuels.

Keywords: Heat pump, refrigerant, the main engine, low-grade heat, heat waste.

REFERENCES

1. Elistratov, S. L. Kompleksnoe issledovanie teplonasnyh ustanovok. Diss. Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze, 2010.
2. Sobolenko, A. N., and R. R. Simashov. *Sudovye jenergeticheskie ustanovki: diplomnoe proektirovanie*. M.: Morkniga, 2015. Ch. 2.
3. Andreev, A. A., V. S. Samohvalov, D. N. Smagin, and V. S. Cviklis. "Sovremennoe sostojanie sistem glubokoj utilizacii vtorichnyh jenergoresursov sudovyh dizelnyh jenergeticheskikh ustanovok." *Zb. nauk. pr. UDMTU* 5(283) (2002): 66–76.
4. Kalinichenko, I. V., and A. A. Andreev. "Teplonasosnoe napravlenie utilizacii vtorichnyh teplovyh resursov sudovoj jenergeticheskoj ustanovki." *Naukovij visnik HDMI* 1(1) (2009): 174–183.
5. Radchenko, N. I., and A. A. Sirota. "Teploutilizirujushhie kontury na nizkokipjashhiih rabochih telah dlja DVS." *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija* 31 (2002): 17–19.
6. Monrealskij protokol po veshhestvam, razrushajushhim ozonovyj sloj. Web. 10 Sept. 2016 <http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/montreal_prot.shtml>.
7. Kontomaris, K. "Global Technology Leader – Working Fluids & Foam Expansion Agents." *IEA Heat Pump Centre Newsletter* 34.1(39) (2016): 4–5.
8. Andreev, A. A., Ju. V. Zaharov, I. V. Kalinichenko, and V. I. Maksimov. "Ocenka jeffektivnosti utilizacii teploty sudovyh glavnyh dizelej teplonasosnymi paroproizvodjashhimi ustanovkami." *Zb. nauk. pr. UDMTU* 2(401) (2005): 70–79.
9. Kalinichenko, I., A. Andreev, and N. Andreeva. "Producing steam of heat pumps on ships." *Vodnyj transport* 2(23) (2015): 48–57.
10. Volyntsev, A. V. "Energetically effective use of heatpump installation in courts of fishing fleet." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 4 (2015): 121–125.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волынцев Александр Владиславович — аспирант.
Научный руководитель:
Соболенко Анатолий Николаевич.
Дальневосточный государственный технический
рыбохозяйственный университет
gold125@list.ru
Соболенко Анатолий Николаевич —
доктор технических наук, профессор.
Морской государственный университет
им. адм. Г.И. Невельского
sobolenko_a@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Volintsev Aleksandr Vladislavovich — postgraduate.
Supervisor:
Sobolenko Anatolij Nikolaevich.
Far Eastern State Technical
Fishery University
gold125@list.ru
Sobolenko Anatolij Nikolaevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Marine State University named
after G.I. Nevelskoy
sobolenko_a@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 сентября 2016 г.