

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

А. Ю. Кузьмин, В. Г. Букин, М. М. Дроздов, А. О. Дроздова

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Российская Федерация*

Рассматриваются вопросы, связанные со сравнительным анализом различных методик оценки эффективности судовых комбинированных тепловых трансформаторов на основе сравнения общих тенденций и количественных значений результатов расчёта тепловых трансформаторов с получением холода в качестве полезного эффекта. Проведён анализ литературы по теме оценки работы энергетических установок, в том числе комбинированных тепловых трансформаторов. В качестве холодильных агентов на судах используются агенты R134a, R22, R744, R717. Холодильный агент R744 не принят к рассмотрению, т. к. предполагаемая температура конденсации находится в субкритической области, что приводит к различиям цикла холодильной машины от других рассматриваемых. Представлена расчётная схема одноступенчатой холодильной машины без регенеративного теплообменника. Количественное сравнение производится на основе получения холодильного коэффициента термодинамического цикла работы судовой холодильной машины различными способами. Результаты сравниваются с показателями идеального цикла Карно и значением холодильного коэффициента без учёта потерь на преобразование электрической энергии в тепловую. На основе полученных данных сделаны выводы о схожести изменения показателей зависимости холодильного коэффициента от температуры кипения, полученных путём расчёта различными методиками. Отмечено, что значение холодильного коэффициента увеличивается с ростом температуры кипения; наибольшее значение коэффициента получено для аммиака (R717). Расчёты могут быть полезны при исследованиях энергетической эффективности судов, под которой понимается получение максимального эффекта на единицу затраченных средств.

Ключевые слова: комбинированные тепловые трансформаторы, теплота, холод, судовые энергетические установки, оценка эффективности, холодильный коэффициент.

Для цитирования: Кузьмин А. Ю., Букин В. Г., Дроздов М. М., Дроздова А. О. Сравнительный анализ способов оценки энергетической эффективности судовых комбинированных тепловых трансформаторов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 2. С. 64–70. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-64-70.

Введение

С каждым годом в России всё актуальнее ставится вопрос о состоянии рыболовного флота. По данным [1], в России в 2010 г. численность рыбодобывающего флота составляет 3 085 единиц, из которых 434 – рефрижераторы различного назначения (включая производственные рефрижераторы); отмечено, что более 80 % судов имеют превышенный срок эксплуатации. К 2017 г. аналогичный качественный состав флота составляет лишь 247 транспортных и производственных судов, включая малый и речной флот. В работе [2] указано, что данный показатель ниже на 28 % для обрабатывающего и на 3 % для приёмно-транспортного флота в сравнении с численностью на 2016 г. Сокращение флота ведёт к повышению цен на производимый продукт и его качество. Источник [3] сообщает о введении пакета нормативно-правовых актов, распределения квот в рыболовной отрасли для строительства новых судов, что позволило в 2017 г. сделать заказ на 33 судна на российских судостроительных верфях. По экспертным оценкам [3], в рамках данного пакета планируется строительство 40 крабовых судов. Однако рост количества судов – не единственный путь удешевления продукции для потребителя. Другой немаловажной составляющей является энергетическая эффективность судов, под которой следует понимать получение максимального эффекта на единицу затраченных средств.

Возможные варианты применения и сравнение способов оценки энергетической эффективности тепловых трансформаторов

Одним из путей повышения энергетической эффективности судов является применение пароконденсационных комбинированных тепловых трансформаторов (КТТ) – машин, одновременно вырабатывающих теплоту и холод. Наиболее очевидным вариантом применения данных машин является отопление и горячее водоснабжение на рефрижераторных судах. На современных судах система отопления реализуется при помощи электрообогрева или системы кондиционирования воздуха [4], при этом в обоих случаях получение данного эффекта сопровождается дополнительными затратами. В зависимости от типа судна и его назначения применение может быть самым разнообразным. К примеру, на судах перерабатывающего класса применение КТТ позволит сократить затраты на проведение процессов тепловой обработки, при этом поддерживая температурный режим в трюмах хранения. Ещё одним направлением применения КТТ является охлаждение главного двигателя по замкнутому контуру [5] с дальнейшим преобразованием теплоты для нужд потребителей высоких температур. Применение комбинированных тепловых трансформаторов актуально не только для строительства новых, но и для реконструкции старых судов. При выборе варианта технического решения ставится вопрос об оценке эффективности его применения. Проводя анализ литературы по теме оценки работы энергетических установок, в том числе и КТТ, нами было предложено несколько методов оценки энергетической эффективности тепловых трансформаторов (ТТ). Большинство из них строятся на базе эксергетического метода термодинамического анализа, основным критерием оценки энергетической эффективности в котором является эксергетический коэффициент полезного действия (КПД). Оценка энергетической эффективности зачастую проводится при помощи холодильного коэффициента ϵ и коэффициента преобразования μ . Однако автор [6] считает, что ϵ и μ не являются объективными критериями оценки энергетической эффективности ТТ, т. к. не учитывают необратимости, связанные со вторым началом термодинамики, и предлагает использование эксергетического метода как более совершенного способа оценки термодинамического совершенства. На основе эксергетического метода в [6] рассматривается энтропийный метод. Автор [7] предлагает использование эксергетического метода, рассчитываемого через температурную эксергетическую функцию [8]. Для сравнения точности и информативности способов оценки был проведён расчёт цикла ТТ с применением вышеописанных методик оценки с целью определения показателей энергетической эффективности работы цикла на разных холодильных агентах.

Согласно требованиям [9], в качестве холодильных агентов на судне возможно использование агентов R134a, R22, R744 и R717. Расчётная температура окружающей среды для холодильных машин, согласно требованиям [9], не должна быть ниже $+40$ °С. Потребители искусственного холода судовых холодильных установок в большинстве имеют температуру, не превышающую $+3$ °С, что является крайней температурой для расчёта. Для анализа выбраны холодильные агенты R134a, R22, R717. Холодильный агент R744 не принят к рассмотрению, т. к. предполагаемая температура конденсации находится в субкритической области, что делает цикл холодильной машины отличным от других рассматриваемых. Для удобства сравнения результатов производится оценка полезного эффекта по холоду при помощи следующих методик: холодильного коэффициента (энергетического), эксергетического [8, 10], энтропийного [6], эксергетического с помощью температурной эксергетической функции [7, 8]. В качестве схемы принимается схема одноступенчатого ТТ без регенеративного теплообменника (рис. 1).

В цикле работы ТТ приняты следующие допущения: процесс сжатия является адиабатическим процессом, не учитываются падения давления на всасывании и депрессия на нагнетании. Согласно [11] перегрев на всасывании для циклов без регенеративного теплообменника принят равным 10 К, переохлаждение жидкости после конденсатора до дроссельного вентиля – 3 К. Разность температур между температурой охлаждаемого объекта и температурой кипения холодильного агента принята равной 10 К, между температурой окружающей среды и температурой конденсации – 15 К. Анализ проводится в пределах рекомендованного функционирования одноступенчатой холодильной машины, соответствующего отношению давления конденсации P_k к давлению кипения P_0 : $P_k / P_0 \leq 9$. Для демонстрации тенденции изменения зависимости холодильного коэффициента ϵ при различных температурах её характеристика продлевается до ближайшего меньшего значения по температуре.

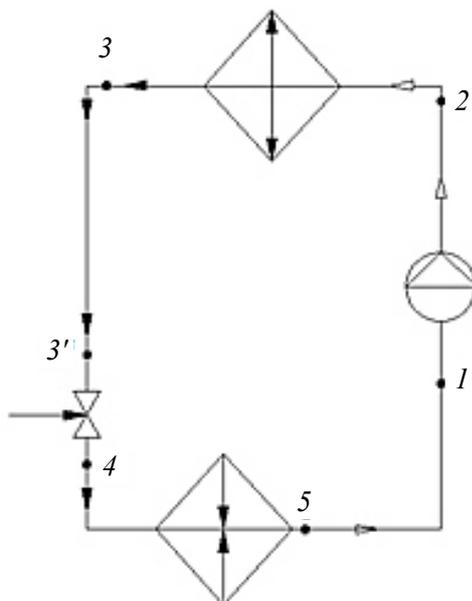


Рис. 1. Расчётная схема одноступенчатой холодильной машины без регенеративного теплообменника:

- 1–2 – процесс сжатия холодильного агента в компрессоре;
- 2–3 – процесс конденсации холодильного агента в конденсаторе;
- 3–3' – процесс переохлаждения жидкого холодильного агента после конденсатора;
- 3'–4 – процесс дросселирования холодильного агента с помощью дроссельного вентиля;
- 4–5 – процесс кипения холодильного агента в испарителе;
- 5–1 – процесс перегрева холодильного агента на всасывании

На основе представленных выше данных произведён расчёт холодильного коэффициента при различных температурах кипения по методикам, приведённым в работах [6–8, 11], для выбранных холодильных агентов. Результаты расчёта для холодильного агента R22 представлены в виде зависимостей холодильного коэффициента ϵ от температуры кипения холодильного агента на рис. 2.

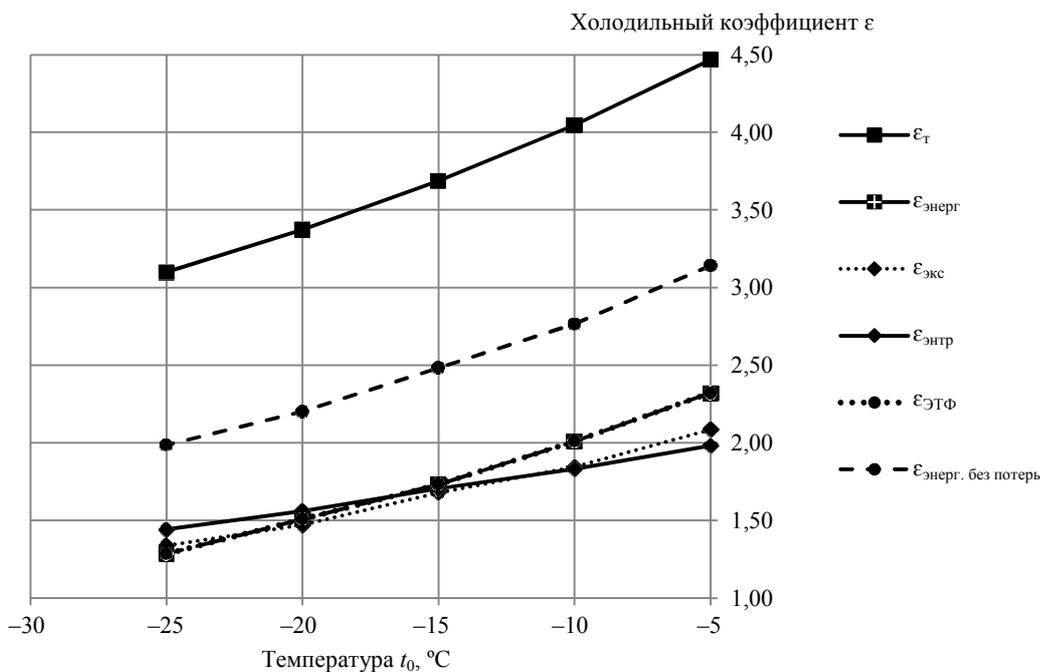


Рис. 2. Зависимость холодильного коэффициента от температуры кипения холодильного агента R22 при температуре конденсации +55 °C

На графике (рис. 2) зависимость ϵ_T соответствует изменению холодильного коэффициента ϵ для идеального обратного цикла Карно и характеризует общую тенденцию последующих зависимостей. Линия имеет нисходящую тенденцию, что не противоречит физическому смыслу и результатам ранних расчётов. Зависимость $\epsilon_{\text{энерг. без потерь}}$ характеризует значение холодильного коэффициента ϵ , не учитывающего потери при передаче механической энергии к рабочему элементу и потери от преобразования механической энергии в тепловую. Зависимость имеет схожий характер, но меньшее значение в силу учёта необратимостей. Линия $\epsilon_{\text{энерг}}$ отображает зависимость холодильного коэффициента ϵ , рассчитанного по энергетическому методу, с учётом потерь при передаче механической энергии к рабочему элементу и от преобразования механической энергии в тепловую. Зависимость имеет схожий характер изменения, при этом отличаясь количественно, в силу увеличения подводимой работы. Линия $\epsilon_{\text{ЭТФ}}$ характеризует зависимость холодильного коэффициента, полученного в результате расчёта эксергии через эксергетическую температурную функцию. В силу методики расчёта значение холодильного коэффициента, полученного при расчёте по данному методу, численно практически совпадает с показателями холодильного коэффициента, рассчитанного по энергетическому методу. Зависимости $\epsilon_{\text{экс}}$ и $\epsilon_{\text{энтр}}$ характеризуют значения холодильного коэффициента, полученного в результате эксергетического и энтропийного анализов цикла соответственно и переведённого через эксергетическую температурную функцию. Данные зависимости имеют схожую тенденцию и характер изменения. Наклон характеристик, отличный от предыдущих характеристик, объясняется меньшим изменением количественного значения работы сжатия по адиабате согласно условиям расчёта и детальному учёту тепловых потерь в окружающую среду.

Сравнение зависимостей холодильных коэффициентов ϵ от изменения температур кипения, полученных различными способами для рассматриваемых холодильных агентов, представлено на рис. 3.

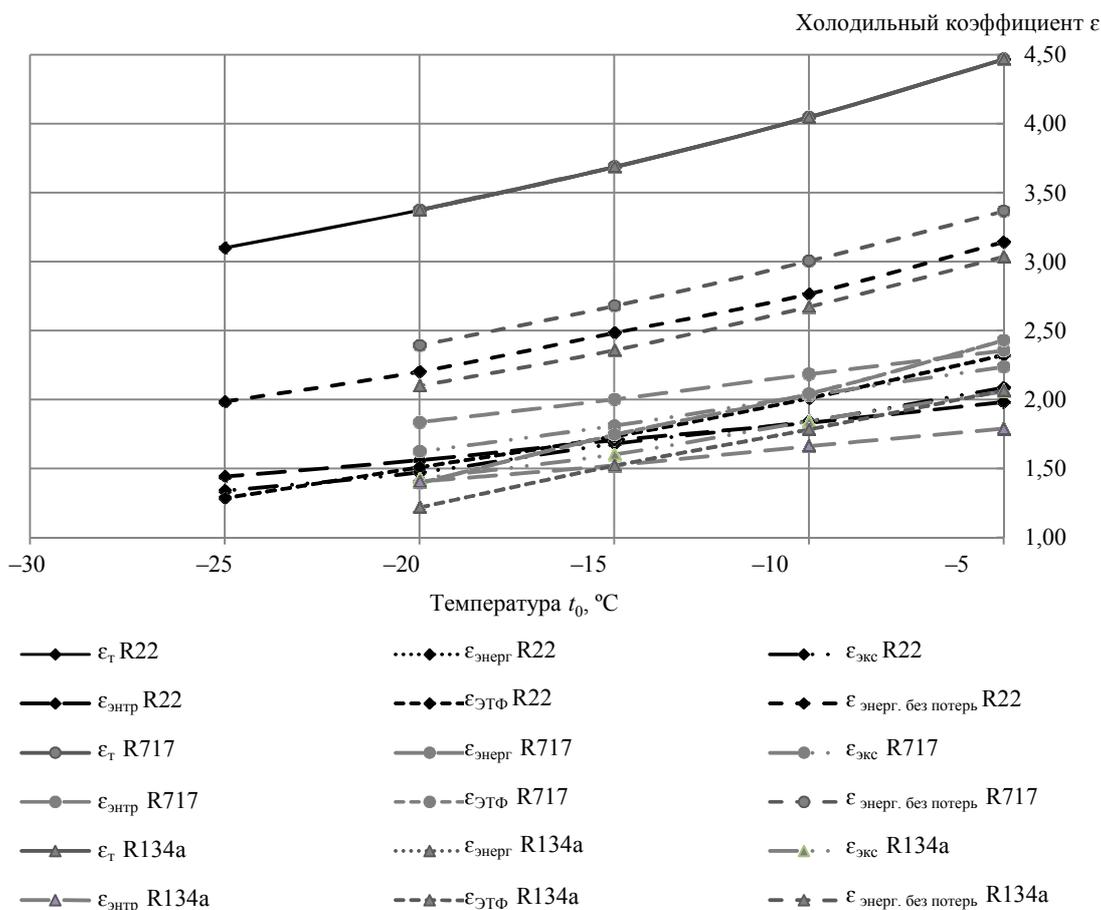


Рис. 3. Зависимость холодильного коэффициента от температуры кипения рассматриваемых холодильных агентов при температуре конденсации +55 °C

Как представлено на диаграмме (рис. 3), зависимости холодильного коэффициента ϵ при расчёте по рассматриваемым методам имеют схожую тенденцию при различных температурах кипения. Зависимость ϵ_T не изменяется в зависимости от применяемого холодильного агента в силу особенностей расчёта. Зависимости $\epsilon_{\text{энерг. без потерь}}$, $\epsilon_{\text{энерг}}$ и $\epsilon_{\text{ЭТФ}}$ имеют различные численные значения в зависимости от холодильного агента, но схожие тенденции изменения, что представлено в работе [12]. Наиболее близким по численным значениям к $\epsilon_{\text{энерг}}$ является $\epsilon_{\text{экс}}$, значение которого также изменяется в зависимости от используемого рабочего вещества.

Выводы

На основе полученных выше результатов можно сделать следующие выводы.

1. Рассматриваемые методы расчёта энергетической эффективности ТТ дают количественно схожий результат.
2. Тенденции к изменению зависимости холодильного коэффициента от температуры кипения при постоянной температуре конденсации имеют схожую тенденцию к изменению на всех рассматриваемых холодильных агентах. С ростом температуры кипения возрастает значение холодильного коэффициента.
3. В зависимости от термодинамических свойств холодильного агента изменяется количественное значение рассматриваемых характеристик на всех участках исследования. Наибольшее значение холодильного коэффициента получено для аммиака (R717).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храпов В. Е. Современное состояние рыбопромыслового флота России: проблемы и перспективы // Вестн. Мурман. гос. техн. ун-та. 2010. Т. 13. № 1. С. 154–157.
2. Итоги деятельности Федерального агентства по рыболовству в 2017 году и задачи на 2018 год. URL: http://fish.gov.ru/files/documents/ob_agentstve/kollegiya/itogi_2017_zadachi_2018.pdf (дата обращения: 15.01.2019).
3. Рыбопромысловый флот помогут обновить инвестквоты // Развитие гражданского судостроения в России – 2017 год: аналитический отчёт для Минпромторга России. 2018. Июнь. С. 27–28.
4. Федотов Д. Г. Теория и устройство корабля: метод. пособие и контрольные задания. Северодвинск: Изд-во Севмашвтуз, 2008. 158 с.
5. Ениватов В. В., Федоровский К. Ю. Энергетическая эффективность замкнутых систем охлаждения энергетических установок судов // Вестник Севастопол. нац. техн. ун-та. Сер.: Машиноприладобудовання та транспорт. 2013. № 143. С. 206–210.
6. Гохштейнд Д. П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок. М.: Энергия, 1969. 368 с.
7. Эль Садек Хассан Нур Эль Дин. Разработка методики оптимизации параметров пароконденсационных машин для комбинированных систем кондиционирования теплоснабжения жилых и общественных зданий: дис. ... канд. тех. наук. М., 2003. 17 с.
8. Галимова Л. В. Энергосберегающие технологии в холодильной технике. Энергоаудит: учеб. пособие. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2015. 136 с.
9. Правила классификации и постройки морских судов от 3 октября 2017 г. // Рос. мор. регистр судоходства. СПб., 2018. Ч. 12. 26 с.
10. Бродянский В. М. Эксергетический метод и его приложения. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
11. Пугарев В. Е., Архипов П. Е. Холодильные машины и установки кондиционирования воздуха. М.: Маршрут, 2003. 424 с.
12. Дроздов М. М. Сравнение эффективности применения схем пароконденсационных тепловых трансформаторов на различных холодильных агентах для совместной выработки теплоты и холода // Материалы 67-й Междунар. студен. науч.-техн. конф. (Астрахань, 17–21 апреля 2017 г.). Астрахань: Изд-во АГТУ, 2017. URL: CD-диск. № гос. регистрации 0321703189.

Статья поступила в редакцию 25.01.2019

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузьмин Андрей Юрьевич – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; kuzmin-astu@yandex.ru.

Букин Владимир Григорьевич – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; г-р техн. наук, профессор; профессор кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; bukinvg@mail.ru.

Дроздов Михаил Михайлович – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; mike_drozdov@mail.ru.

Дроздова Анна Олеговна – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; магистрант кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; gen996@ya.ru.



COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS ESTIMATING POWER EFFICIENCY OF SHIP COMBINED THERMOTRANSFORMERS

A. Yu. Kuzmin, V. G. Bukin, M. M. Drozdov, A. O. Drozdova

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation*

Abstract. The article discusses the issues related to the comparative analysis of various methods for evaluating the efficiency of ship combined thermotransformers, based on a comparison of similar trends and quantitative values of calculation results of heat transformers producing cold as a useful effect. There has been conducted analysis of literature on evaluating power plants operation, including combined thermotransformers. Agents R134 a, R22, R744, R717 are used as refrigerants on ships. The refrigerant R744 is not approved, because the assumed condensation temperature lies in a subcritical area, which makes cycles of a refrigerating machine differ from the other refrigerating machines under study. There has been given a design model of a one-step refrigerating machine without a regenerative heat exchanger. Quantitative comparison is made on the basis of obtaining the refrigeration coefficient of a thermodynamic cycle of the ship chilling machine operation in various ways. The results are compared with the parameters of the ideal Carnot's principle and the refrigeration coefficient value neglecting losses from converting electrical energy into thermal energy. On the basis of the obtained data there have been drawn the conclusions about similarity of changing parameters of the dependence of the refrigeration coefficient on the boiling point obtained by calculations using various methods. It has been stated that the value of cooling coefficient is a direct function of boiling temperature; the maximum coefficient is found for ammonia (R717). The analysis may be useful in studying the ship power efficiency, which means producing maximum effect per a unit of expended cost.

Key words: combined thermotransformers, heat, cold, marine power systems, performance evaluation, cooling coefficient.

For citation: Kuzmin A. Yu., Bukin V. G., Drozdov M. M., Drozdova A. O. Comparative analysis of methods estimating power efficiency of ship combined thermotransformers. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2019;2:64-70. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-64-70.

REFERENCES

1. Khrapov V. E. Sovremennoe sostoianie rybopromyslovogo flota Rossii: problemy i perspektivy [Current state of fishing fleet in Russia: problems and future possibilities]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, vol. 13, no. 1, pp. 154-157.
2. *Itogi deiatel'nosti Federal'nogo agentstva po rybolovstvu v 2017 godu i zadachi na 2018 god* [Overall results of activities of the Federal Fishery Agency in 2017 and objectives for 2018]. Available at: http://fish.gov.ru/files/documents/ob_agentstve/kollegiya/itogi_2017_zadachi_2018.pdf (accessed: 15.01.2019).
3. Rybopromyslovyi flot pomogut obnovit' investkvoty [Fishing fleet can be modernized by investqutas]. *Razvitie grazhdanskogo sudostroeniia v Rossii – 2017 god: analiticheskii otchet dlia Minpromtorga Rossii*, 2018, June, pp. 27-28.

4. Fedotov D. G. *Teoriia i ustroistvo korablia: metodicheskoe posobie i kontrol'nye zadaniia* [Theory and structure of a ship: teaching aid and tests]. Severodvinsk, Izd-vo Sevmashvtuz, 2008. 158 p.
5. Enivatov V. V., Fedorovskii K. Iu. Energeticheskaiia effektivnost' zamknutykh sistem okhlazhdeniia energeticheskikh ustanovok sudov [Power efficiency of closed cooling systems of ship power plants]. *Visnik Sevastopol'skogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinopriladobuduvannia ta transport*, 2013, no. 143, pp. 206-210.
6. Gokhshteind D. P. *Sovremennye metody termodinamicheskogo analiza energeticheskikh ustanovok* [Modern methods of thermodynamic analysis of power plants]. Moscow, Energiia Publ., 1969. 368 p.
7. El' Sadek Khassan Hyp El' Din. *Razrabotka metodiki optimizatsii parametrov parokompressionnykh mashin dlia kombinirovannykh sistem konditsionirovaniia teplosnabzheniia zhilykh i obshchestvennykh zdanii: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Developing optimization methods of parameters of steam compressive mechanisms for combined systems of conditioning heat in residential buildings and offices: diss. cand. tech. sci.]. Moscow, 2003. 17 p.
8. Galimova L. V. *Energoberegaiushchie tekhnologii v kholodil'noi tekhnike. Ergoaudit: uchebnoe posobie* [Power saving technologies in refrigerating machinery]. Astrakhan', Izd-vo AGTU, 2015. 135 p.
9. Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov ot 3 oktiabria 2017 g. [Rules for classification and building sea-going vessels dated 3 October, 2017]. *Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva*. Saint-Petersburg, 2018. Part 12. 26 p.
10. Brodianskii V. M. *Eksergeticheskii metod i ego prilozheniia* [Exoergic method and its application]. Moscow, Ergoatomizdat, 1988. 288 p.
11. Pigarev V. E., Arkhipov P. E. *Kholodil'nye mashiny i ustanovki konditsionirovaniia vozdukha* [Refrigerating machines and air conditioning units]. Moscow, Marshrut Publ., 2003. 424 p.
12. Drozdov M. M. *Sravnienie effektivnosti primeneniia skhem parokompressionnykh teplovykh transformatorov na razlichnykh kholodil'nykh agentakh dlia sovmestnoi vyrabotki teploty i kholoda* [Comparing efficiency of using steam compressing thermotransformer circuits on different refrigerants for combiner producing heat and cold]. *Materialy 67-i Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Astrakhan', 17–21 aprelia 2017 g.)*. Astrakhan', Izd-vo AGTU, 2017. Available at: CD-disc. № gosudarstvennoj registratsii 0321703189.

The article submitted to the editors 25.01.2019

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuzmin Andrey Yurievich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Heat Power Engineering and Refrigerating Machines; kuzmin-astu@yandex.ru.

Bukin Vladimir Grigorievich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Heat Power Engineering and Refrigerating Machines; bukinvg@mail.ru.

Drozdov Mikhail Mikhailovich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department of Heat Power Engineering and Refrigerating Machines; mike_drozdov@mail.ru.

Drozdova Anna Olegovna – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Master's Course Student of the Department of Heat Power Engineering and Refrigerating Machines; ren996@ya.ru.

