

ПОСТРОЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КАРТЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

М. М. Дроздов, Л. В. Галимова, А. Ю. Кузьмин

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Российская Федерация*

Рассматривается методика построения температурной карты, позволяющей производить оценку термодинамической эффективности судовых комбинированных тепловых трансформаторов. В качестве анализируемых холодильных агентов при построении температурной карты выбраны хладагенты R134a, R717. Представлены результаты расчета степени термодинамического совершенства одноступенчатых комбинированных тепловых трансформаторов без регенеративного теплообменника. Приведена зависимость изменения степени термодинамического совершенства от температуры кипения и конденсации. Предложено разделение и классификация областей данной зависимости. Описан процесс определения и построения характеристик, ограничивающих предел использования рассматриваемых тепловых трансформаторов. Выявлены величины, влияющие на положение выделенных областей на температурной карте. Для выбранных хладагентов представлены зависимости для корректировки положения областей в зависимости от величины перегрева, величины переохлаждения и разности температур между температурой кипения и температурой низкпотенциального источника теплоты. Продемонстрирован принцип использования разработанной температурной карты. Проанализировано применение температурной карты при определенных исходных данных: хладагент R134a; температура конденсации: 40 °С; температура кипения: –20 °С; температура окружающей среды: 20 °С; перегрев пара – 20 К; переохлаждение жидкости – 8 К; разность температур между источником низкпотенциальной теплоты и температурой кипения – 8 К. На графике проиллюстрирован пример использования температурной карты для определения возможности применения комбинированных тепловых трансформаторов с заданными параметрами на холодильном агенте R134a. Выведены уравнения для корректировки положения линий температурных карт для хладагентов, разрешенных к использованию в судовых энергетических установках.

Ключевые слова: комбинированные тепловые трансформаторы, теплота, холод, судовые энергетические установки, оценка эффективности, термодинамический анализ, температурная карта.

Для цитирования: Дроздов М. М., Галимова Л. В., Кузьмин А. Ю. Построение и использование температурной карты для определения термодинамической эффективности судовых парокомпрессионных тепловых трансформаторов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 3. С. 82–92. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-82-92.

Введение

Вопросы, связанные с оценкой эффективности парокомпрессионных тепловых трансформаторов, применяемых в качестве судовых комбинированных тепловых трансформаторов (КТТ), рассматривались в работе [1]. На основе проведенного сравнения был выбран энтропийный метод анализа. В методике оценки термодинамической эффективности на основе выбранного метода использованы имитационные модели теплофизических свойств рабочих веществ CoolPack. На основе [2–5] в методике применены модели изменения индикаторного и механического КПД, а также КПД привода и электродвигателя, в зависимости от степени повышения давления. Поскольку в реальных тепловых трансформаторах при отсутствии охлаждения рабочей полости компрессора сжатие не является адиабатным процессом, на основе данных [6–8] разработана методика определения величины энтропии конца сжатия пара. Для удобства применения данных, полученных в результате термодинамического анализа циклов на разных хладагентах, разработа-

на температурная карта, позволяющая определить термодинамическую эффективность теплового трансформатора для текущих условий и спрогнозировать ее модификацию при изменении параметров цикла. Методика построения и использования температурных карт представлена ниже.

Построение температурной карты

Согласно требованиям [9] в качестве холодильных агентов на судне возможно использование агентов R134a, R22, R744 и R717. Для анализа выбраны холодильные агенты R134a, R717. Холодильный агент R744 не принят к рассмотрению, т. к. предполагаемая температура конденсации находится в надкритической области, что делает цикл холодильной машины отличным от других рассматриваемых. Использование R22 полностью прекращено [10].

В качестве расчетной схемы принимается схема одноступенчатого теплового трансформатора без регенеративного теплообменника [4]. Для проведения анализа выбраны следующие исходные параметры: температуры кипения в диапазоне от 0 °С до температуры, соответствующей давлению кипения, определяемому по формуле $P_0 = P_k / 9$ [3, 4, 11], с шагом в 5 К. Температура окружающей среды принимается равной 20 °С; диапазон температур конденсации составляет от 30 до 60 °С с шагом в 10 К; перегрев пара на всасывании принимается равным 10 К для всех рассчитываемых циклов; переохлаждение жидкого хладагента после конденсатора принято равным 3 К [11]. Проведена серия построения циклов на выбранных хладагентах. Для каждого цикла определена степень термодинамического совершенства при работе в режиме совместной выработки теплоты и холода. Результаты расчета представлены на рис. 1.

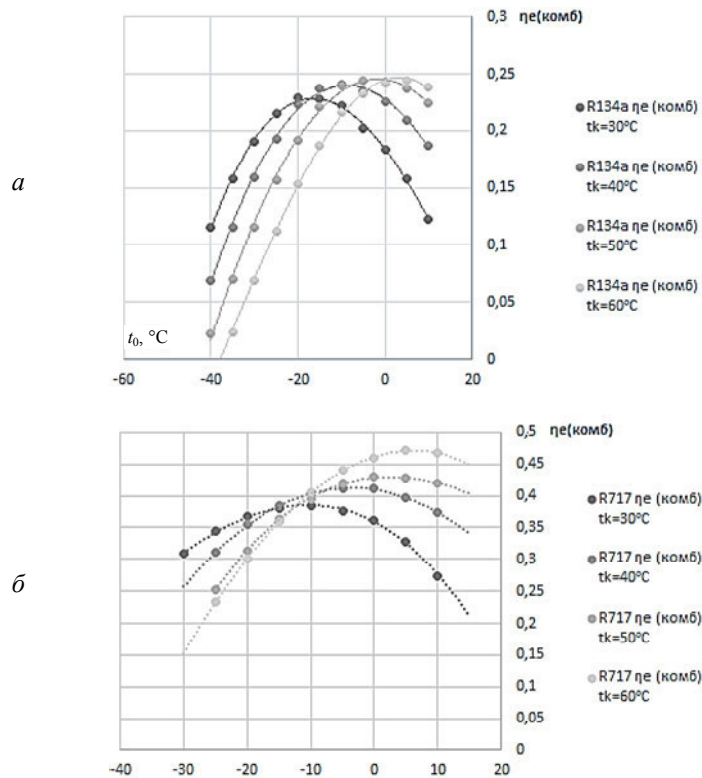


Рис. 1. Характеристики изменения степени термодинамического совершенства для хладагентов в зависимости от температуры кипения при различных температурах конденсации: а – R134a; б – R717

Все характеристики на графиках (рис. 1) имеют схожий характер изменения. При повышении температуры кипения и при постоянной температуре конденсации характеристика степени термодинамического совершенства сначала возрастает, достигая максимума. При дальнейшем повышении температуры кипения величина степени термодинамического совершенства начинает

убывать. С ростом температуры конденсации экстремум характеристики увеличивается по своему значению, при этом характеристика смещается в область более высоких температур кипения.

При добавлении оси изменения температуры конденсации к имеющимся координатным осям характеристики, представленные на рис. 1, приобретают вид криволинейной поверхности. Поверхность для хладагента R134a проиллюстрирована на рис. 2.

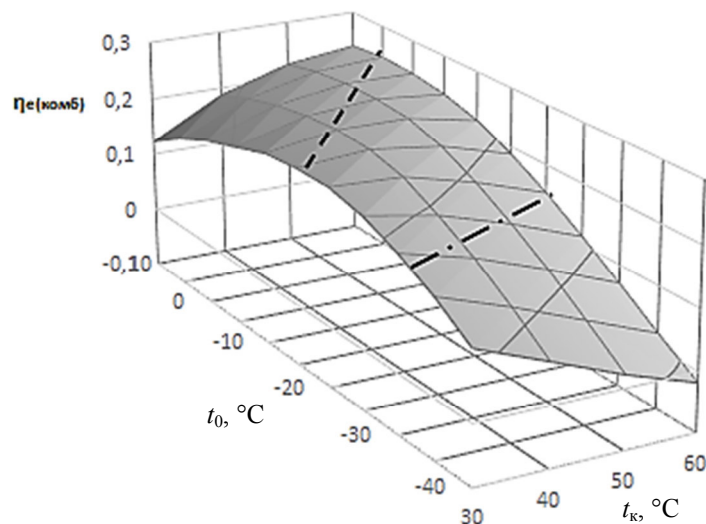


Рис. 2. Поверхность изменения степени термодинамического совершенства при различных температурах кипения и конденсации для хладагента R134a:

----- – линия максимальной эффективности;
 - · - · - · – линия ограничения зоны высокой эффективности

При рассмотрении данной поверхности (рис. 2) можно выделить четыре основные области:

- область максимальной эффективности, в которой степени термодинамического совершенства имеют максимальное значение;
- область высокой эффективности, в которой изменение значений степени термодинамического совершенства не превышает 0,05 от максимального значения при текущих температурах кипения и конденсации;
- область возможного использования, где отклонение степени термодинамического совершенства от его максимального значения не превышает 0,1;
- область неэффективного использования – оставшаяся область температурной карты.

Точки экстремумов характеристик степени термодинамического совершенства образуют линию изменения максимальной эффективности (штриховая линия на рис. 2). На основе приведенной выше классификации относительно описанной выше линии образуются другие линии, ограничивающие выделенные области.

При построении температурной карты учтен ряд ограничений, связанных с техническими возможностями теплового трансформатора и теплофизическими свойствами хладагента. Для компрессоров, работающих на рабочих телах групп ГФУ (гидрофторуглеродов) и ГХФУ (гидрохлорфторуглеродов), согласно [12] максимальная температура нагнетания не должна превышать 150 °С для хладагентов среднего давления и 140 °С для высокотемпературных хладагентов. Температура нагнетания аммиачных поршневых компрессоров не должна превышать 160 °С, для винтовых – 90 °С [13]. Степень повышения давления в компрессоре не превышает 9.

При приближении к критической точке величина скрытой теплоты фазового превращения стремится к нулю, в связи с чем использование КТТ в этой области нецелесообразно. С учетом данного ограничения максимальная температура конденсации должна быть ниже критической температуры на 10 К. Результаты построения в указанном температурном поле приведены на рис. 3. Область, ограниченная линиями максимально возможных температуры конденсации, степени повышения давления и температурой нагнетания, является областью

использования КТТ. Выход за пределы указанных характеристик возможен при использовании других вариантов схем либо иного хладагента. Получены характеристики изменения максимальной эффективности и высокой эффективности КТТ.

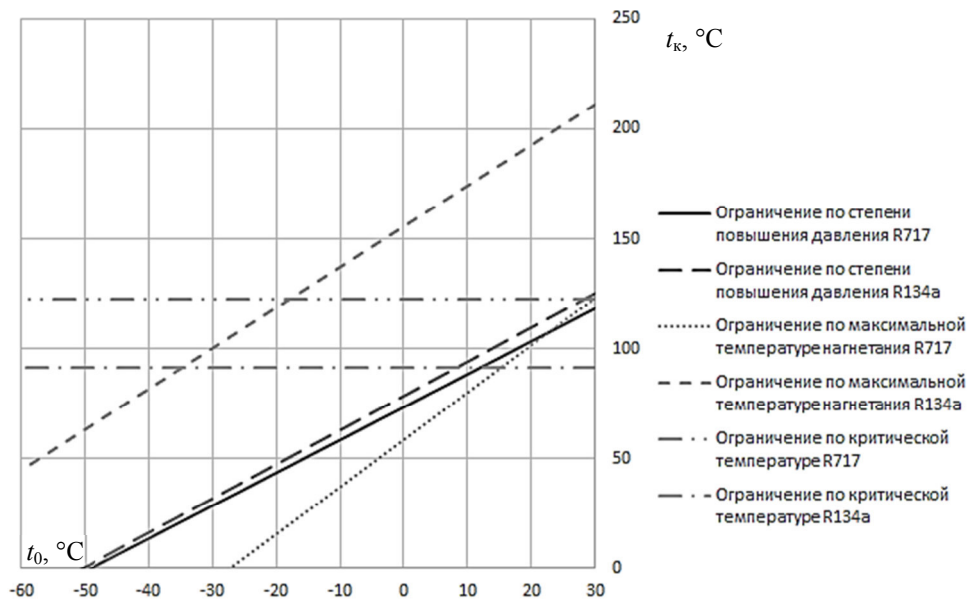


Рис. 3. Линии ограничения области возможного применения КТТ для хладагентов R717 и R134a

При нанесении всех характеристик на плоскость, осями которой являются температура кипения и температура конденсации, получена базовая температурная карта. На рис. 4 представлена базовая температурная карта для хладагента R717.

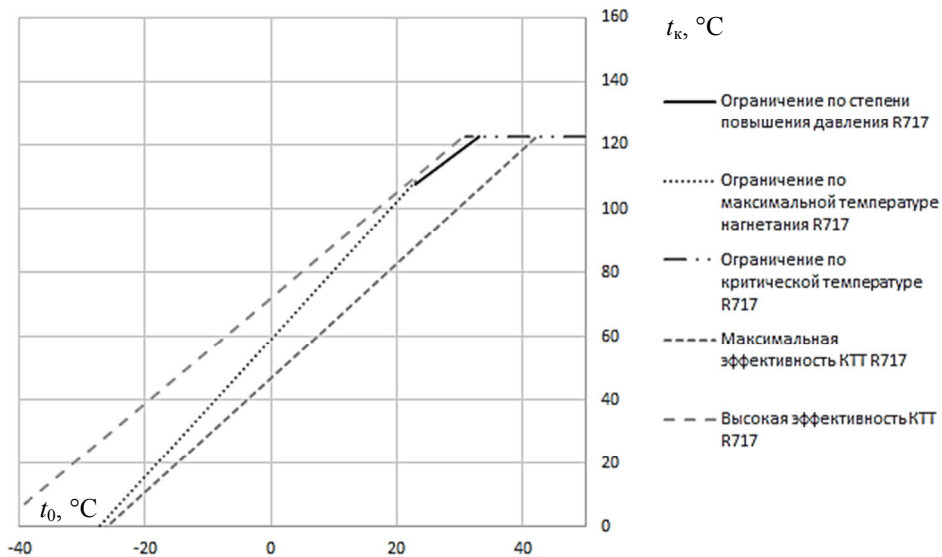


Рис. 4. Базовая температурная карта одноступенчатого КТТ для хладагента R717

Для хладагента R717 линия высокой эффективности КТТ выходит за пределы области возможного использования, однако для других рабочих вещества данная линия может располагаться внутри границы области возможного использования.

Проведен анализ влияния изменения параметров цикла на положение областей максимальной и высокой эффективности температурной карты. В результате выявлено, что при увеличении перегрева пара на всасывании, переохлаждении жидкости после конденсатора и увеличении разности температур между источником низкопотенциальной теплоты и температурой кипения хладагента точки максимальной эффективности и высокой эффективности приобретают меньшее количественное значение при более низких температурах кипения. Изменение положения линий при изменении указанных выше параметров и постоянной температуре конденсации для хладагента R134a представлено на рис. 5.

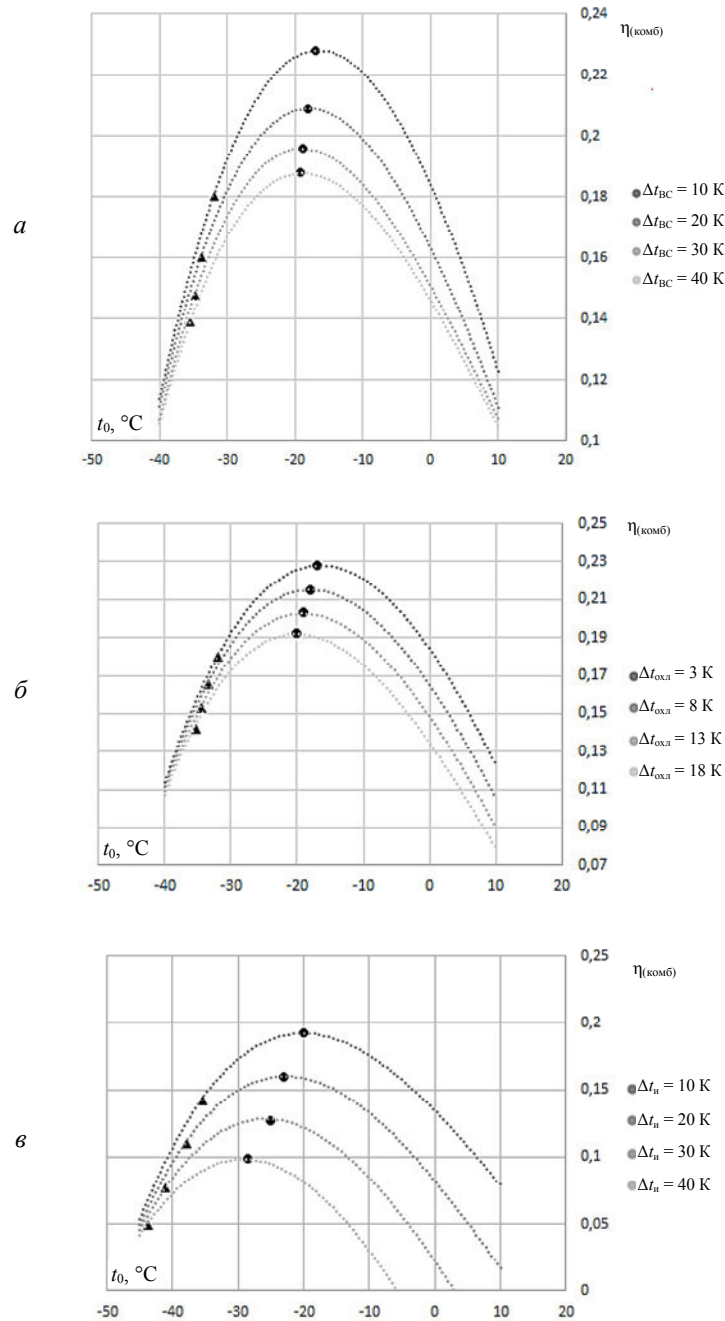


Рис. 5. Изменение характеристики степени термодинамического совершенства КТТ на R134a при изменении: *а* – величины перегрева пара на всасывании; *б* – величины переохлаждения жидкости перед дросселированием; *в* – разности температур между источником низкопотенциальной теплоты и температурой кипения;
● – максимальная эффективность КТТ; ▲ – высокая эффективность КТТ

Согласно графикам (рис. 5) с ростом изменяемого параметра характеристика степени термодинамического совершенства смещается в область более низких температур. При этом количественное значение степени термодинамического совершенства при постоянной температуре кипения снижается. Изменения, представленные на графиках (рис. 5, а, б), происходят в результате возрастания величины термодинамических потерь в процессах перегрева и переохлаждения. При изменении величины перегрева на всасывании за счет более высокой температуры процесса возрастают необратимости процесса сжатия. С увеличением разности температур между температурой кипения и температурой низкопотенциального источника теплоты возрастают необратимости, вызванные конечной разностью температур. В результате воздействия перечисленных факторов соотношение полезной и затрачиваемой эксергии достигает характера, соответствующего экстремуму при более низких температурах кипения и новом значении степени термодинамического совершенства. Очевидно, что смещение характеристик при постоянной температуре конденсации происходит нелинейно, при этом смещение положения экстремума и точек высокой эффективности неэквидистантно.

Для учета изменения положения линий на температурной карте на основе расчета циклов с различными параметрами получены поправочные кривые для характеристик областей максимальной и высокой эффективности КТТ.

Результаты построения и аппроксимации поправочных величин для R717 и R134a приведены на рис. 6–8.

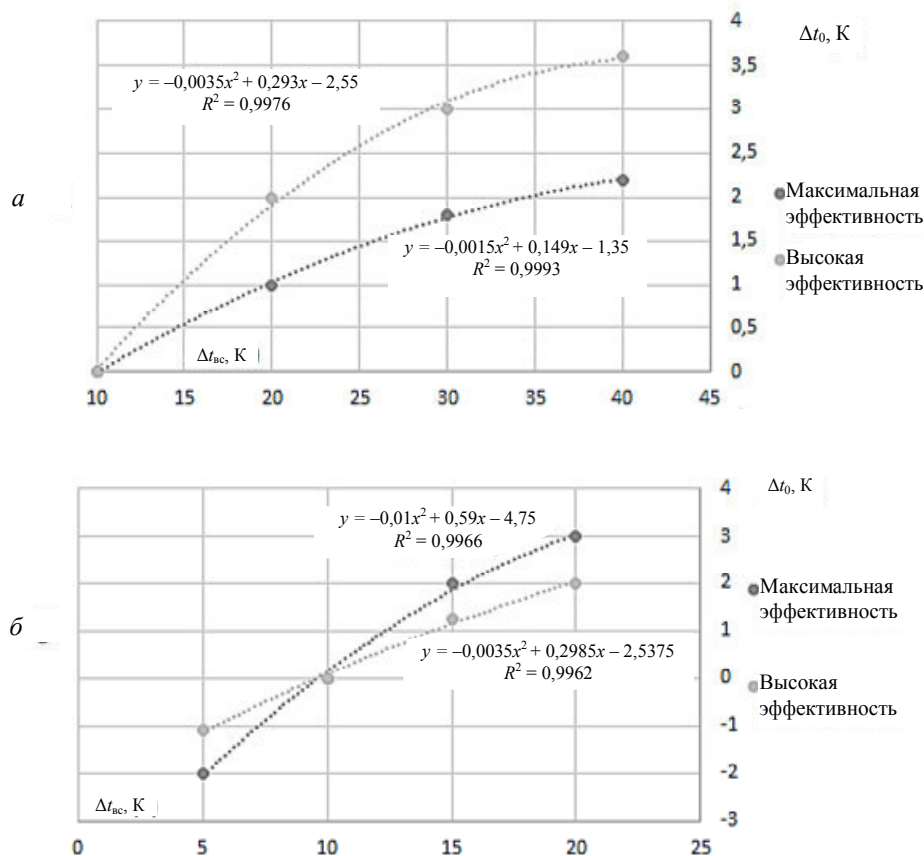


Рис. 6. Изменение поправочных величин в зависимости от величины перегрева пара хладагента на всасывании в компрессор: а – R134a; б – R717

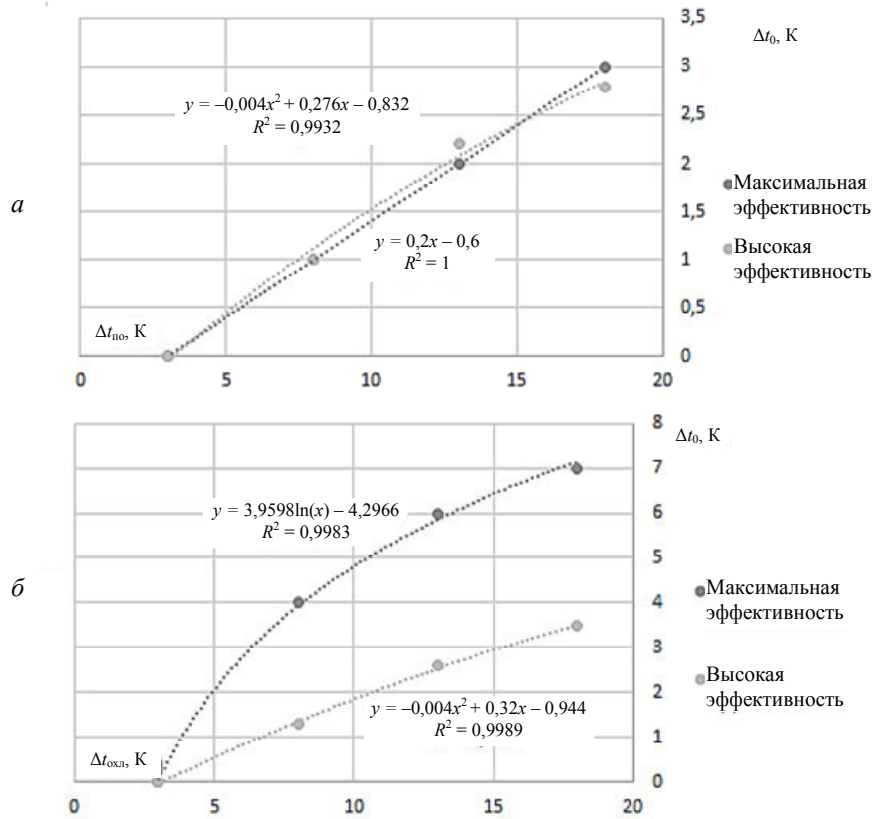


Рис. 7. Изменение поправочных величин в зависимости от величины переохлаждения жидкости перед дросселированием: а – R134a; б – R717

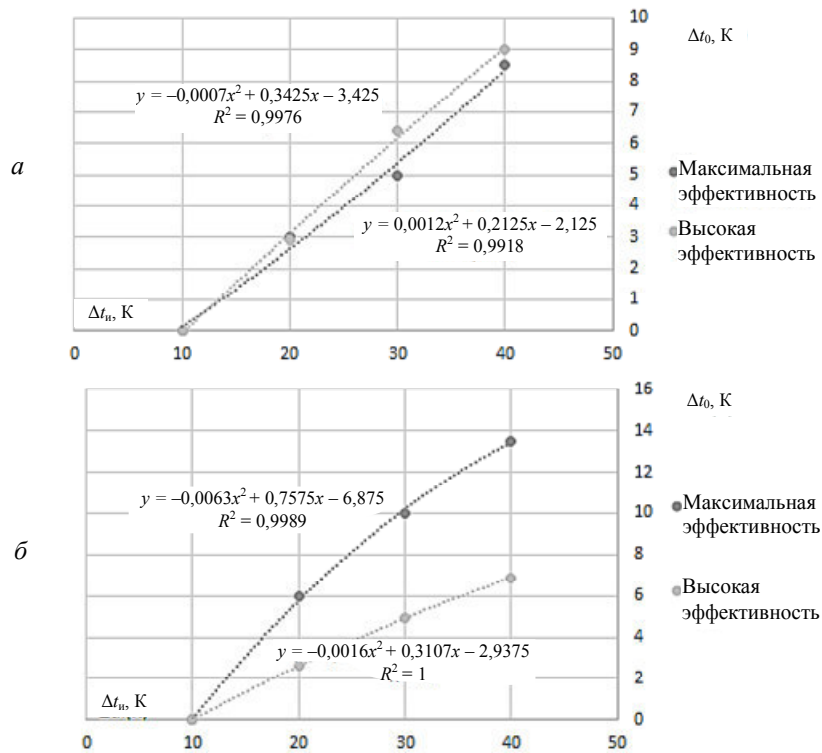


Рис. 8. Изменение поправочных величин в зависимости от разности температур между источником низкпотенциальной теплоты и температурой кипения: а – R134a; б – R717

Представленные на рис. 6–8 характеристики являются изменением указанных по оси абсцисс величин относительно их значения на базовой температурной карте. Для определения нового положения характеристик высокой и максимальной эффективности на температурной карте используется выражение

$$t'_0 = t_0 - \sum \Delta t_0,$$

где t_0 – температура кипения, соответствующая базовому положению характеристики; $\sum \Delta t_0$ – сумма поправочных величин от различных факторов.

Применение температурной карты

В качестве примера рассмотрено применение температурной карты при следующих исходных данных: температура конденсации: +40 °С; температура кипения: –20 °С; перегрев пара – 20 К; переохлаждение жидкости – 8 К; разность температур между источником низкопотенциальной теплоты и температурой кипения – 8 К; температура окружающей среды – 20 °С; хладагент R134a.

Первоначально область использования КТТ ограничивается двумя перпендикулярными линиями, соответствующими минимально возможному значению температур конденсации и кипения. Поскольку КТТ предназначен для нагрева сред до температуры выше температуры окружающей среды, для определения минимальной рабочей температуры конденсации для воздушных конденсаторов используется рекомендованная в [4] конечная разность температур между температурой конденсации и температурой окружающей среды. Для определения минимальной рабочей температуры кипения используется рекомендованная разность температур [4] между температурой кипения и температурой охлаждаемого объекта. Далее по осям откладывают значения текущей температуры кипения и конденсации. Результаты построения для выбранного температурного режима представлены на рис. 9.

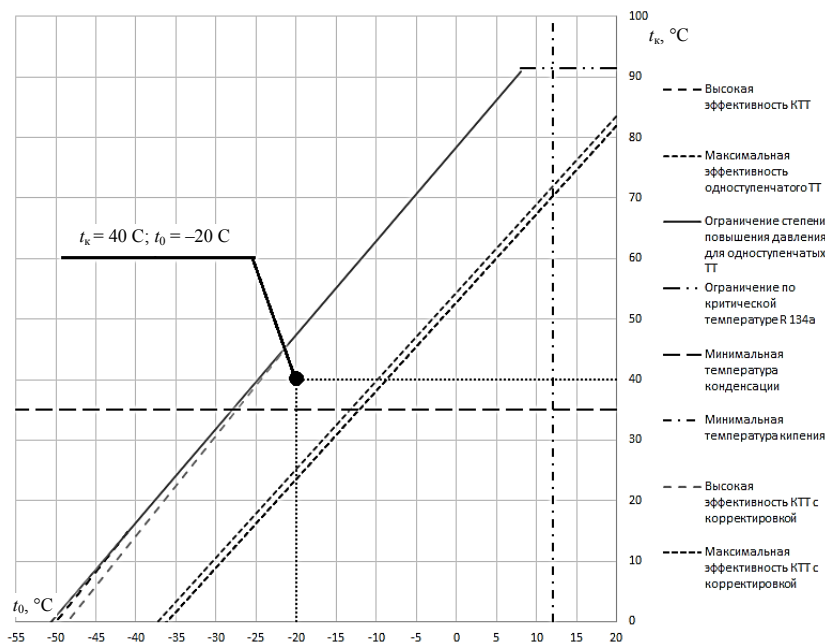


Рис. 9. Пример использования температурной карты для определения возможности применения КТТ с заданными параметрами на хладагенте R134a

Для оценки положения точки по формулам, приведенным на рис. 6, а; 7, а; 8, а, рассчитаны и суммированы поправочные величины. Поскольку результат сложения поправочных величин в данном случае отрицательный, смещение характеристик максимальной эффективности КТТ и высокой эффективности КТТ происходит в сторону более высоких температур кипения. Полученная точка лежит в области технически возможного использования одноступенчатых КТТ, входит в область, ограниченную минимальными температурами, а также в область высокой эффективности КТТ.

Изменяя величины перегрева, переохлаждения и разности температур между температурой кипения и температурой низкопотенциального источника, можно добиться более высокой эффективности КТТ, не изменяя температурных уровней процессов кипения и конденсации, однако решение о целесообразности изменения того или иного параметра принимается для каждого КТТ индивидуально, на основе технико-экономического обоснования.

Выводы

На основе приведенных выше материалов можно сделать следующие выводы:

1. Разработана температурная карта для определения целесообразности применения КТТ на основе энтропийного метода термодинамического анализа;
2. Разработана температурная карта для оценки эффективности одноступенчатых КТТ на хладагентах R717 и R134a;
3. Получены уравнения для корректировки положения линий температурных карт для хладагентов, разрешенных к применению в судовых энергетических установках;
4. Температурная карта позволяет производить оценку термодинамической эффективности применения КТТ как для проектируемых, так и для действующих тепловых трансформаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов М. М., Дроздова А. О., Букин В. Г., Кузьмин А. Ю. Сравнительный анализ способов оценки энергетической эффективности судовых комбинированных тепловых трансформаторов // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2019. № 2. С. 64–70.
2. Пигарев В. Е., Архипов П. Е. Холодильные машины и установки кондиционирования воздуха. М.: Маршрут, 2003. 424 с.
3. Абдулманов Х. А., Балыкова Л. И., Сарайкина И. П. Холодильные машины и установки, их эксплуатация: учеб. пособие. М.: Колос, 2006. 328 с.
4. Бараненко А. В. и др. Холодильные машины / под ред. Л. С. Тимофеевского. СПб.: Политехника, 2006. 941 с.
5. КПД электродвигателя / ООО «РДЭ». URL: <https://www.rosdiler-electro.ru/kpd-jelektrodvigatelja.html> (дата обращения: 22.06.2021).
6. BitzerSoftware. URL: <https://www.bitzer.de/websoftware/> (дата обращения: 22.06.2021).
7. Галимова Л. В., Джумурбаев Р. Ю., Марченко О. С., Биржанов А. С. Эксергетический анализ поршневого холодильного компрессора, охлаждаемого водой // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2010. № 2 (50). С. 22–26.
8. Мальшев А. А., Киреев В. С. Эксергетический анализ теплового насоса для условий Северо-Запада России // Науч. журн. НИУ ИТМО. Сер.: Холодильная техника и кондиционирование. 2017. № 4. С. 22–30.
9. Правила классификации и постройки морских судов (от 03 октября 2017 г.) / Российский морской регистр судоходства. СПб.: Изд-во РМРС, 2018. Ч. 12. 26 с.
10. The 1987 Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozon Layer. Nairobi, Kenya, UNEP, 1987. URL: <https://ozone.unep.org/treaties/1987-montreal-protocol-substances-deplete-ozon-layer> (дата обращения: 23.06.2021).
11. Кошкин Н. Н., Сакун И. А., Бамбушек Е. М. и др. Холодильные машины / под ред. И. А. Сакуна. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. 511 с.
12. Правила устройства и безопасной эксплуатации фреоновых холодильных установок. М.: ВНИКТИХолодпром, 1988. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293818/4293818428.htm> (дата обращения: 24.06.2021).
13. ПБ 09-595-03. Правила безопасности аммиачных холодильных установок. М.: ПИО ОБТ, 2003. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/39/39942/> (дата обращения: 24.06.2021).

Статья поступила в редакцию 25.06.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Лариса Васильевна Галимова – д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; Астраханский государственный технический университет; Россия, 414056, Астрахань; galimova_lv@mail.ru.

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



BUILDING AND USING TEMPERATURE CHART TO DETERMINE THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF SHIP STEAM-COMPRESSION HEAT TRANSFORMERS

M. M. Drozdov, L. V. Galimova, A. Yu. Kuzmin

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation*

Abstract. The article highlights the method of constructing a temperature chart, which allows evaluating the thermodynamic efficiency of ship combined thermal transformers. Refrigerants R134a, R717 were selected as the analyzed refrigerants in the construction of the temperature chart. The results of calculating the degree of thermodynamic perfection of single-stage combined thermal transformers without a regenerative heat exchanger are presented. The dependence of changing thermodynamic perfection on the melting and condensation temperature is given. The separation and classification of the areas of this dependence is proposed. The process of determining and constructing the characteristics that set the limit of application of the considered thermal transformers is described. The values influencing the position of the selected regions on the temperature chart are revealed. For the selected refrigerants there have been presented the dependences for correcting position of the areas depending on the amount of overheating, degree of supercooling and temperature difference between the boiling point and the temperature of low-potential heat source. The application of the temperature chart is analyzed under the following initial data: refrigerant R134a; condensation temperature 40°C; boiling point –20°C; ambient temperature 20°C; steam overheating 20 K; supercooling of the liquid 8 K; temperature difference between the low-grade heat source and the boiling point 8 K. The graph illustrates an example of using a temperature chart to determine the possibility of using combined heat transformers with specified parameters on the refrigerant R134a. Equations are derived for correcting the position of the lines of temperature charts for refrigerants permitted for the ship power plants.

Key words: combined heat transformers, heat, cold, marine power plants, efficiency assessment, thermodynamic analysis, temperature chart.

For citation: Drozdov M. M., Galimova L. V., Kuzmin A. Yu. Building and using temperature chart to determine thermodynamic efficiency of ship steam-compression heat transformers. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2021;3: 82-92. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-82-92.

REFERENCES

1. Drozdov M. M., Drozdova A. O., Bukin V. G., Kuz'min A. Iu. Sravnitel'nyi analiz sposobov otsenki energeticheskoi effektivnosti sudovykh kombinirovannykh teplovykh transformatorov [Comparative analysis of methods for assessing energy efficiency of ship combined heat transformers]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2019, no. 2, pp. 64-70.
2. Pigarev V. E., Arkhipov P. E. *Kholodil'nye mashiny i ustanovki konditsionirovaniia vozdukha* [Refrigerating machines and air conditioning installations]. Moscow, Marshrut Publ., 2003. 424 p.
3. Abdul'manov Kh. A., Balykova L. I., Saraikina I. P. *Kholodil'nye mashiny i ustanovki, ikh ekspluatatsiia: uchebnoe posobie* [Operation of refrigerating machines and units: tutorial]. Moscow, Kolos Publ., 2006. 328 p.

4. Baranenko A. V. i dr. *Kholodil'nye mashiny* [Refrigerating machines]. Pod redaktsiei L. S. Timofeevskogo. Saint-Petersburg, Politekhnik Publ., 2006. 941 p.
5. *KPD elektrodvigatelia* [Efficiency of electric motor]. ООО «RDE». Available at: <https://www.rosdiler-electro.ru/kpd-jelektrodvigatelja.html> (accessed: 22.06.2021).
6. *BitzerSoftware*. Available at: <https://www.bitzer.de/websoftware/> (accessed: 22.06.2021).
7. Galimova L. V., Dzhumurbaev R. Iu., Marchenko O. S., Birzhanov A. S. Eksergeticheskii analiz porshnevnogo kholodil'nogo kompressora, okhlazhdaemogo vodoi [Exergetic analysis of piston refrigeration compressor cooled by water]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 2 (50), pp. 22-26.
8. Malyshev A. A., Kireev V. S. Eksergeticheskii analiz teplovogo nasosa dlia uslovii Severo-Zapada Rossii [Exergetic analysis of heat pump for operation in the North-West of Russia]. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Kholodil'naia tekhnika i konditsionirovanie*, 2017, no. 4, pp. 22-30.
9. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov (ot 03 oktiabria 2017 g.)* [Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships (dated 03 October, 2017)]. Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva. Saint-Petersburg, Izd-vo RMRS, 2018. Part 12. 26 p.
10. *The 1987 Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. Nairobi, Kenya, UNEP, 1987. Available at: <https://ozone.unep.org/treaties/1987-montreal-protocol-substances-deplete-ozone-layer> (accessed: 23.06.2021).
11. Koshkin N. N., Sakun I. A., Bambushek E. M. i dr. *Kholodil'nye mashiny* [Refrigerating machines]. Pod redaktsiei I. A. Sakuna. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningradskoe otdelenie, 1985. 511 p.
12. *Pravila ustroistva i bezopasnoi ekspluatatsii freonovykh kholodil'nykh ustanovok* [Rules for design and safe operation of freon refrigeration units]. Moscow, VNIKTikhodprom Publ., 1988. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293818/4293818428.htm> (accessed: 24.06.2021).
13. *PB 09-595-03. Pravila bezopasnosti ammiachnykh kholodil'nykh ustanovok* [PB 09-595-03. Safety rules for ammonia refrigeration plants]. Moscow, PIO OBT, 2003. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data1/39/39942/> (accessed: 24.06.2021).

The article submitted to the editors 25.06.2021

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Larisa V. Galimova – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Heat Power Engineering and Refrigerating Machines; Astrakhan State Technical University; Russia, 414056, Astrakhan; galimova_lv@mail.ru.

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

