

## ТЕПЛОВЫЕ ДИАГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЦИКЛОВ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН, РАБОТАЮЩИХ НА СМЕСЕВОМ ХЛАДАГЕНТЕ

*В. Г. Букин, А. В. Ежов, А. И. Андреев*

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Российская Федерация*

Рассматриваются преимущества и недостатки холодильных машин, работающих на неазеотропных смесях хладагентов. Проиллюстрирована их главная особенность по сравнению с чистыми веществами – неизотермичность при фазовых переходах, что может быть эффективно при охлаждении или нагревании потоков, которые значительно изменяют свою температуру, и неэффективно при работе с объемами, в которых требуется поддерживать неизменную температуру. В первом случае происходит уменьшение внутренней необратимости процессов теплообмена в испарителях и конденсаторах, во втором – увеличение. При использовании смесевых хладагентов в одноступенчатой машине возможно одновременно получить несколько температурных уровней при одном давлении в испарителях, можно получить низкие температуры кипения хладагента без вакуума в испарителе и регулировать холодопроизводительность машины путем изменения состава смеси. Аргументированы перспективы применения смесей, рабочих тел холодильных машин. Представлены диаграммы  $T-S$ ,  $T-\xi$ ,  $i-\xi$ , позволяющие рассчитать цикл работы машины, определить ее рабочие параметры и вычислить технические и энергетические характеристики. Разработанные тепловые диаграммы позволяют точно рассмотреть динамику процессов кипения и конденсации бинарной смеси, иллюстрируют изменение концентраций смеси в паровой и жидкостной фазах, предоставляют возможность построить и рассчитать цикл холодильной машины, работающей на смесевом хладагенте. Рассмотрены примеры построения циклов двух схем холодильных машин, работающих на смесевом хладагенте: с разделением потока рабочего вещества и без разделения. Представлены методики расчета цикла.

**Ключевые слова:** холодильная машина, смесевые хладагенты, цикл, диаграммы, сравнение результатов.

**Для цитирования:** Букин В. Г., Ежов А. В., Андреев А. И. Тепловые диаграммы для расчета циклов холодильных машин, работающих на смесевом хладагенте // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 4. С. 79–86. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-4-79-86.

### Введение

Рабочие вещества судовых холодильных установок, такие как фреоны 12 и 22, аммиак, по экологическим показателям запрещены и находятся в стадии прекращения производства или опасны при использовании. Взамен им предлагаются смесевые хладагенты.

Применение смесевых хладагентов имеет как преимущества, так и недостатки. Главная их особенность по сравнению с чистыми веществами состоит в неизотермичности при фазовых переходах, это может быть эффективно при охлаждении или нагревании потоков, которые значительно изменяют свою температуру, и неэффективно при работе с объемами, в которых требуется поддерживать неизменную температуру [1]. В первом случае это приводит к уменьшению внутренней необратимости процессов теплообмена в испарителях и конденсаторах, во втором – к увеличению [2, 3].

При использовании смесевых хладагентов возможно одновременное получение в одноступенчатой машине нескольких температурных уровней при одном давлении в испарителях; кроме того, в них можно получить низкие температуры кипения хладагента без вакуума в испарителе и регулировать холодопроизводительность машины путем изменения состава смеси. Все это свидетельствует о перспективности применения смесей как рабочих тел холодильных машин [2, 3].

Известно, что интенсивность теплообмена при фазовых переходах смесей и составляющих их компонентов значительно отличаются [4, 5]. В то же время характеристики поршневого

компрессора мало отличаются, если рабочие вещества близки по свойствам. Отсюда следует, что главные изменения характеристик холодильных машин будут определяться качеством работы испарителей и конденсаторов, поэтому определение свойств смесей в процессе кипения и конденсации является ключевой частью этой проблемы.

### Холодильные машины на смесевых хладагентах

В Астраханском государственном техническом университете и Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики (ИТМО) выполнено комплексное исследование неазеотропной бинарной смеси R22/142b. Ее молекулярная масса: 91,2; нормальная температура кипения:  $-36 \div -32$  °С (в зависимости от концентрации смеси). Критическая температура: 114,8 °С; критическое давление: 5,6 МПа; показатель адиабаты  $k = 1.16$ .

Работа была составной частью комплексной программы фундаментальных исследований проблем машиностроения, механики и процессов управления раздела 2 «Машиностроение» Российской академии наук, включена в план научных программ Международной академии холода по секции теоретических основ холодильной и криогенной техники. Использование данной смеси в холодильной технике рекомендовано Межведомственной комиссией при Правительстве Российской Федерации.

На основании теоретических и экспериментальных данных предложены рабочие концентрации смеси:  $\xi_1 = 0,6$  кг/кг;  $\xi_2 = 0,7$  кг/кг.

Для расчета холодильных машин нужны тепловые диаграммы, в которых можно построить циклы работы машины, определить параметры характерных точек и рассчитать технические и энергетические показатели этих машин.

Рассмотрим схемы одноступенчатых холодильных машин, работающих на смесевом хладагенте.

При работе по схеме на рис. 1, а смесевой хладагент после сжатия в компрессоре Км, под давлением конденсации  $P_k$  поступает в конденсатор Кд, где происходит сбив перегрева и конденсация, в теплообменнике ТО жидкий хладагент переохлаждается парами, идущими из испарителя И, в регулирующем вентиле РВ происходит дросселирование, часть жидкости превращается в пар при давлении кипения  $P_0$ , оставшаяся жидкость кипит в испарителе, совершая холодильное действие, и пар через теплообменник ТО поступает в компрессор Км, цикл замыкается. Цифры на рисунке соответствуют точкам на представленных ниже диаграммах циклов холодильной машины и иллюстрируют состояние рабочего вещества в обозначенном месте холодильной машины.

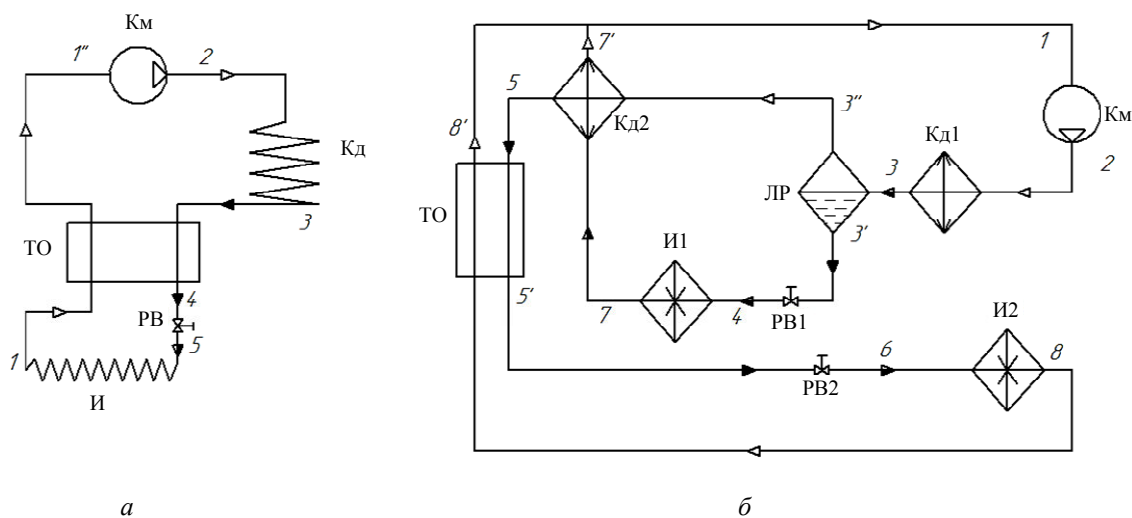


Рис. 1. Схема холодильных машин: а – без разделения потока; б – с разделением потока

Для отображения процессов цикла построена тепловая диаграмма  $T - S$  [6–8]. Цикл в диаграмме изображен на рис. 2, где проиллюстрирована неизотермичность при кипении от  $-28$  до  $-22$  °С, при конденсации от  $44$  до  $35$  °С.

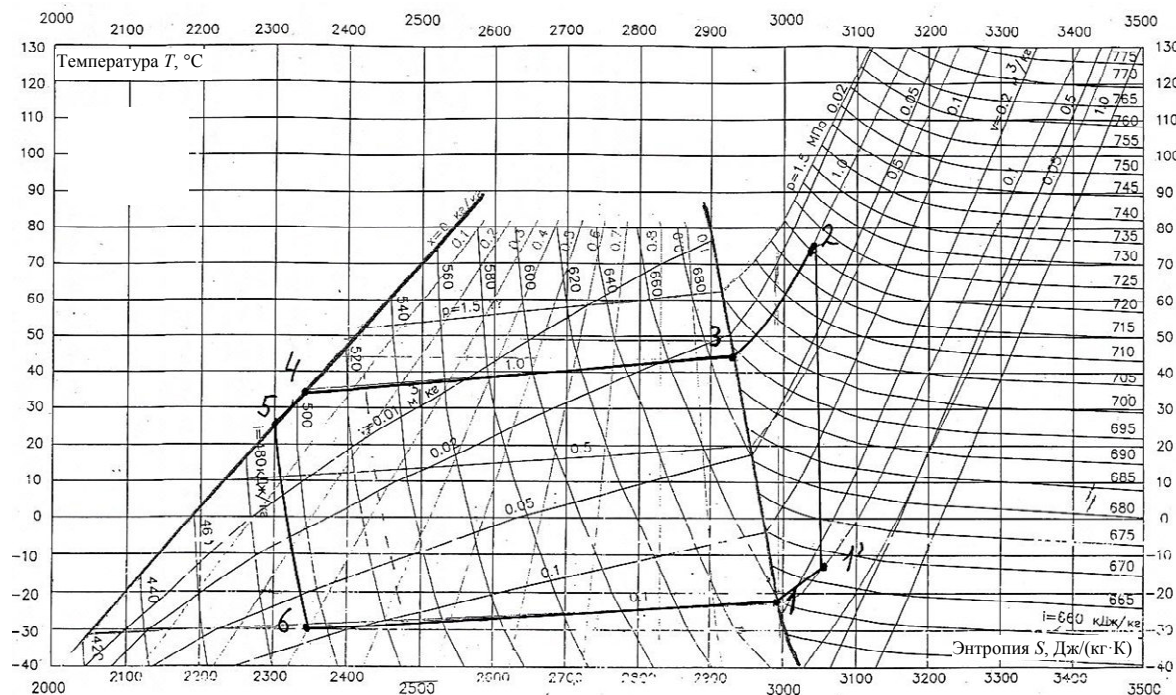


Рис. 2. Цикл в диаграмме  $T - S$  для холодильной машины по схеме на рис. 1, а

В данном случае реализуется цикл Лоренца, где при расчете холодильного коэффициента удобнее пользоваться средней температурой кипения и конденсации. Но тепловая диаграмма не позволяет подробно рассмотреть процессы при фазовых переходах, связанные с изменением концентрации жидкости и пара, что можно сделать, используя диаграмму  $T - \xi$  [6], где построен цикл работы холодильной машины, работающей на смеси с рабочей концентрацией  $\xi_p = 0,6$  кг/кг (рис. 3).

Как можно заметить, после сбива перегрева 2–3 начинается конденсация, первым каплям жидкости соответствует точка 3' с той же температурой  $t^3 = 44$  °С, но с меньшей концентрацией  $\xi_{3'} = 0,3$  кг/кг. По мере конденсации пара в проточном конденсаторе его состояние изменяется по линии насыщения до точки 4 с постоянным ростом концентрации до  $\xi_4 = 0,84$  кг/кг и понижением температуры до  $35$  °С, в то время как концентрация образующейся жидкости возрастает и после конденсации последних объемов пара становится равной рабочей концентрации  $\xi_p = 0,6$  кг/кг [4].

Далее в теплообменнике жидкость переохлаждается 4–5, и после РВ получается парожидкостная смесь в состоянии 5, в которой имеется жидкость в состоянии 5' и пар 5'' с температурой  $-28$  °С и  $P_0$ . При кипении жидкости в проточном испарителе ее концентрация уменьшается до  $0,24$  кг/кг с соответствующим повышением температуры до  $-22$  °С. Образующийся при кипении пар также повышает свою температуру с понижением концентрации. После испарения последнего объема жидкости пар будет иметь рабочую концентрацию  $\xi_p = 0,6$  кг/кг [9]. Далее происходит перегрев в теплообменнике 1–1' и сжатие в компрессоре 1'–2 с постоянной концентрацией  $\xi_p = 0,6$  кг/кг.

Положение точки 2 определяется по формуле

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{P_0}{P_k} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (1)$$

где  $k$  – показатель адиабаты смеси.

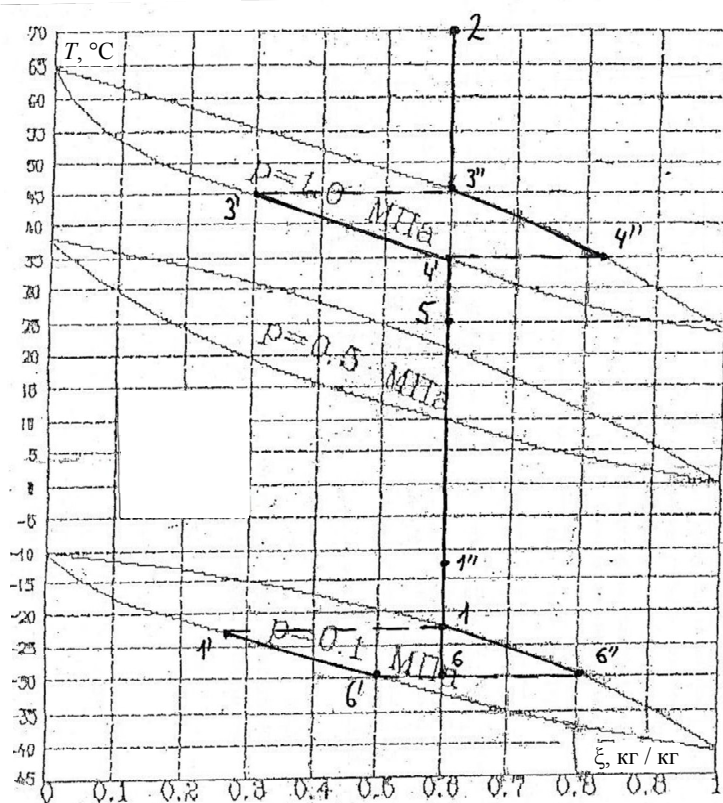


Рис. 3. Цикл в диаграмме  $T-\xi$  для холодильной машины по схеме на рис. 1, а

Неизотермичность при конденсации объясняется тем, что из двух компонентов смеси R142b в тех же условиях конденсируется при более высокой температуре, поэтому в начале процесса он конденсируется в большей степени, тем самым повышая концентрацию оставшегося пара до  $\xi_4 = 0,84$  кг/кг и снижая температуру процесса  $t_4$  до  $35$  °C. При кипении смеси легкокипящим компонентом является R22, поэтому в начале кипения он выкипает в большей степени, уменьшая концентрацию жидкости  $\xi_1$  до  $0,24$  кг/кг и повышая температуру  $t_1$  до  $-22$  °C.

На рис. 1, б представлена схема холодильной машины, работающей на смеси с разделением хладагента на два потока с разными концентрациями. После сжатия в компрессоре Км смесь под давлением  $P_k$  и рабочей концентрацией  $\xi_p$  поступает в конденсатор Кд1, охлаждаемый окружающей средой, где происходит частичная конденсация смеси с большим содержанием легкоконденсирующего компонента в жидкости, т. е. концентрация жидкости, принимающаяся всегда по низкипящему компоненту, будет меньше рабочей, и поэтому концентрация оставшегося пара будет выше рабочей. Затем парожидкостная смесь поступает в линейный ресивер ЛР, где разделяется на жидкость и пар. Жидкость дросселируется в регулирующем вентиле РВ1 и под давлением  $P_0$  поступает в высокотемпературный испаритель И1, где частично выкипает. Оставшаяся парожидкостная смесь попадает в конденсатор Кд2, где жидкость выкипает, отбирая теплоту от конденсирующегося пара. Конденсат через теплообменник, где он переохлаждается, и регулирующий вентиль РВ2 попадает в низкотемпературный испаритель И2 под давлением  $P_0$ , где жидкость испаряется, а пар, нагреваясь в теплообменнике, смешивается с паром, идущим из конденсатора Кд2, и идет на всасывание компрессора под давлением  $P_0$  и концентрацией  $\xi_p$ .

Поскольку концентрация смеси в холодильной машине имеет три значения (в компрессоре Км и первом конденсаторе Кд1 – рабочая  $\xi_p$ ; в высокотемпературном испарителе И1 и испарительной части конденсатора Кд2 – меньше рабочей:  $\xi_1 < \xi_p$ ; в низкотемпературном испарителе И2 и конденсаторе Кд2 – больше рабочей:  $\xi_2 > \xi_p$ ), то построить цикл работы такой машины в общепринятых тепловых диаграммах невозможно. Для построения цикла и расчета таких холодильных машин создана специальная диаграмма  $i-\xi$  (рис. 4) [6].



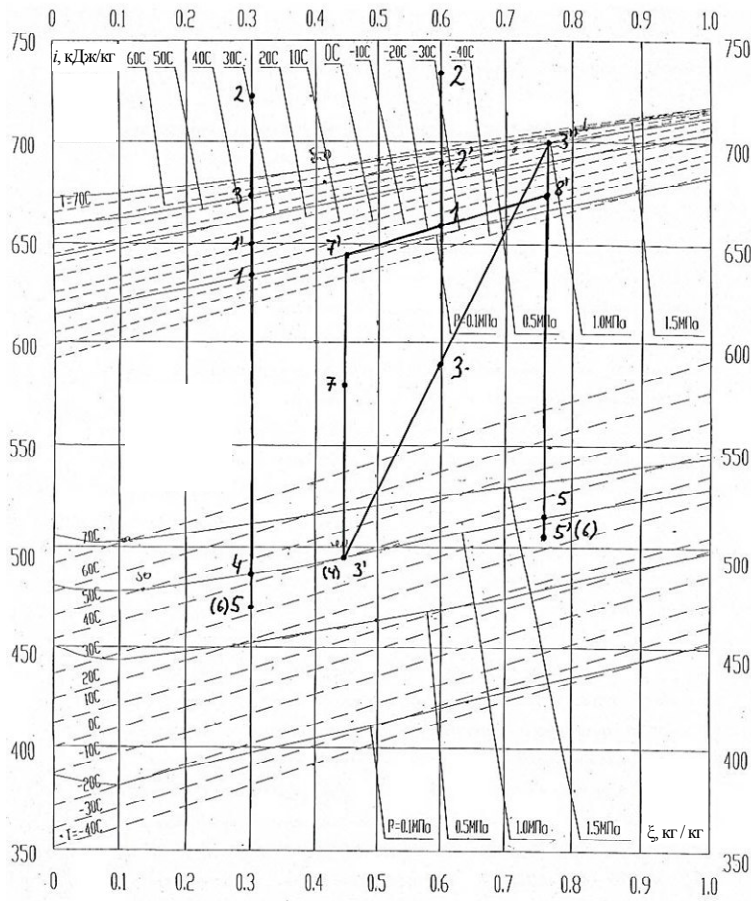


Рис. 4. Циклы в диаграмме  $i - \xi$  для холодильных машин по схеме на рис. 1, а и 1, б

Цикл этой машины построен для тех же давлений  $P_k$  и  $P_0$ , что и для машины по схеме на рис. 1, а. После компрессора смесь при давлении  $P_k$  и  $\xi_{\text{в}}$  поступает в конденсатор Кд1, где происходит сбив перегрева (2–2') и частичная конденсация до состояния 3, затем разделяется на жидкость 3' и пар 3'', положение этих точек определяется давлением  $P_k$  и равной температурой  $t_3 = t_{3''} = t_{3'}$ , при этом жидкость будет иметь концентрацию  $\xi_{3'}$ , а пар  $\xi_{3''}$ . Жидкость 3' дросселируется в РВ1, но поскольку в этом процессе не изменяется ни энтальпия, ни суммарная концентрация, то положение точки 4 совпадает с точкой 3', но уже при  $P_0$ . В испарителе И1 жидкость частично выкипает до состояния 7, а затем полностью выкипает в испарительной части конденсатора Кд2 (7–7'). В другой ветви пар 3'' конденсируется в Кд2 (3''–5), переохлаждается в ТО (5–5') при  $P_k$  и  $\xi_{3''}$ , дросселируется в РВ2, точка 6 совпадает с точкой 5' при  $P_0$  и  $\xi_{3''}$ , кипит в испарителе И2 (6–8), перегревается в ТО (8–8') до температуры точки 7' и смешивается с паром 7, который имеет то же  $P_0$ , но  $\xi_{3'}$ . После смешения получается рабочая концентрация  $\xi_{\text{в}}$  при  $P_0$  (состояние 1).

Далее пар идет в компрессор. Положение точки 2 определяется по формуле (1).

На диаграмме (рис. 3) можно изобразить цикл машины, выполненной по схеме рис. 1, а, с концентрацией, например,  $\xi_{\text{в}} = 0,3$  кг/кг, которая в цикле не изменяется. Номера точек на диаграмме соответствуют схеме на рис. 1, а.

### Расчет цикла

При разделении потока на две ветви обозначим пар с высоким содержанием низкокипящего компонента –  $M$ , тогда содержание жидкости будет  $(1 - M)$ , где  $M$ :

$$M = \frac{(i_3 - i_{3'})}{(i_{3''} - i_{3'})}$$

где  $i$  – энтальпия рабочего тела в соответствующей точке.

Удельная холодопроизводительность в низкотемпературном испарителе, кДж/кг:

$$q_{01} = M(i_8 - i_6).$$

Удельная холодопроизводительность в высокотемпературном испарителе, кДж/кг:

$$q_{02} = (1 - M)(i_7 - i_4).$$

Удельная теплота конденсации в первом конденсаторе, кДж/кг:

$$q_{k1} = i_2 - i_3.$$

Тепловой баланс второго конденсатора:

$$M(i_{3''} - i_5) = (1 - M)(i_7 - i_7).$$

Удельная работа компрессора, кДж/кг:

$$l = i_2 - i_1.$$

Холодильный коэффициент:

$$e = \frac{(q_{01} + q_{02})}{l}.$$

### Заключение

Разработанные тепловые диаграммы позволяют точно рассмотреть динамику процессов кипения и конденсации бинарной смеси, иллюстрируют изменение концентраций смеси в паровой и жидкостной фазах и дают возможность построить и рассчитать цикл холодильной машины, работающей на смесевом хладагенте.

Сопоставление циклов машин по схемам на рис. 1 доказывает, что с разделением потока при том же давлении конденсации и кипения за счет большей концентрации низкокипящего компонента в испарителе можно получить значительно более низкие температуры. Если по схеме на рис. 1, а минимальная температура в испарителе  $t_0 = -28$  °С, то по схеме на рис. 1, б минимальная температура  $t_0 = -42$  °С без вакуума в испарителе и в одноступенчатом цикле. Если учесть, что при работе по второй схеме понижается и давление конденсации при неизменной температуре окружающей среды, то можно получить более низкую температуру кипения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов Я. И., Гейдерих В. А. Термодинамика растворов. М.: Изд-во МГУ, 1980. 183 с.
2. Букин В. Г., Кузьмин А. Ю. Экспериментальное исследование малых холодильных машин на смеси R22/R142b // Холодильная техника. 1996. № 5. С. 12–14.
3. Букин В. Г., Кузьмин А. Ю., Кокуев А. Д. Использование смеси R22/R142b для замены в действующем холодильном оборудовании // Холодильная техника. 1997. № 8. С. 8–10.
4. Букин В. Г., Кузьмин А. Ю. Обработка результатов экспериментальных исследований процесса конденсации неазеотропных смесей холодильных агентов R142b-R22 на горизонтальной трубе // Сб. Санкт-Петербург. гос. акад. холода и пищевых технологий. СПб.: Изд-во СПГАХиПТ, 1994. С. 82–86.
5. Букин В. Г., Шуришев В. Ф., Данилова Г. Н., Лебедкина И. К. Влияние концентрации на теплообмен при кипении смеси холодильных агентов R22/R142b // Теплофизические свойства холодильных агентов и процессы тепломассообмена: межвуз. сб. науч. тр. СПб.: Изд-во СПГАХиПТ, 1996. С. 68–71.
6. Букин В. Г., Кузьмин А. Ю., Ежов А. В. Т – ξ, i – ξ и Т – S диаграммы для смеси R22/R142b // Холодильная техника России. Состояние и перспективы накануне XXI века: сб. науч. тр. СПб.: Изд-во СПГАХиПТ, 1998. С. 14–15.
7. Букин В. Г., Кузьмин А. Ю., Ежов А. В. Тепловые диаграммы смеси холодильных агентов R22/R142b // Свойства рабочих веществ и процессы тепломассообмена в холодильных установках: межвуз. сб. науч. тр. СПб.: Изд-во СПГАХиПТ, 2000. С. 32–34.
8. Ребров П. Н., Букин В. Г. Исследование теплоотдачи фреона R22 в затопленных испарителях крупных фреоновых турбокомпрессорных холодильных установок // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2017. № 1 (63). С. 45–49.

9. Букин В. Г., Шуршев В. Ф., Данилова Г. Н. Экспериментальное исследование теплообмена смеси R22/R142b в испарителях холодильных машин // Холодильная техника. 1996. № 3. С. 10–11.

Статья поступила в редакцию 21.07.2020

### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

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

**Ежов Алексей Васильевич** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; bukinvg@mail.ru.

**Андреев Александр Иванович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; магистрант кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; aresut79@mail.ru.



## **TEMPERATURE-ENTROPY DIAGRAMS FOR CALCULATING CYCLES OF REFRIGERATING MACHINES USING REFRIGERANT MIXTURES**

***V. G. Bukin, A. V. Ezhov, A. I. Andreev***

*Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russian Federation*

**Abstract.** The article represents the advantages and disadvantages of refrigeration machines operating on non-azeotropic refrigerant mixtures. There has been illustrated their specific feature in comparison with pure substances: they are non-isothermal during phase transitions. It can be effective when cooling or heating flows that significantly change the temperature, and ineffective when working with volumes, where it is necessary to maintain a constant temperature. In the first case there takes place a decrease in the internal irreversibility of heat transfer processes in evaporators and condensers; in the second case - an increase. When using mixed refrigerants, it is possible to simultaneously obtain several temperature levels in a single-stage machine at the same pressure in the evaporators, they can obtain low boiling points of the refrigerant without vacuum in the evaporator and regulate the refrigeration capacity of the machine by changing the composition of the mixture. The prospects of using mixtures of working bodies of refrigerating machines have been proved. The diagrams T-S, T- $\xi$ , i- $\xi$  are presented allowing to calculate the cycle of the machine, to determine its operating parameters and to calculate the technical and energy characteristics. The developed thermal diagrams make it possible to accurately examine the dynamics of the boiling and condensation processes of a binary mixture, show the change in the concentration of the mixture in the vapor and liquid phases and make it possible to construct and calculate the cycle of a refrigeration machine operating on a mixed refrigerant. Examples of constructing cycles of two schemes of refrigeration machines operating on a mixed refrigerant are considered: with separation of the working substance flow and without separation. Methods for calculating the cycle are provided.

**Key words:** refrigeration machine, mixed refrigerants, cycle, diagrams, comparison of results.

**For citation:** Bukin V. G., Ezhov A. V., Andreev A. I. Temperature-entropy diagrams for calculating cycles of refrigerating machines using refrigerant mixtures. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;4:79-86. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-4-79-86.

## REFERENCES

1. Gerasimov Ia. I., Geiderikh V. A. *Termodinamika rastvorov* [Thermodynamics of solutions]. Moscow, Izd-vo MGU, 1980. 183 p.
2. Bukin V. G., Kuz'min A. Iu. Eksperimental'noe issledovanie malykh kholodil'nykh mashin na smesi R22/R142b [Experimental study of small refrigeration machines on mixture of R22 / R142b]. *Kholodil'naia tekhnika*, 1996, no. 5, pp. 12-14.
3. Bukin V. G., Kuz'min A. Iu., Kokuev A. D. Ispol'zovanie smesi R22/R142b dlia zameny v deistvuiushchem kholodil'nom oborudovanii [Using mixture of R22 / R142b for replacement in operating refrigeration equipment]. *Kholodil'naia tekhnika*, 1997, no. 8, pp. 8-10.
4. Bukin V. G., Kuz'min A. Iu. Obrabotka rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy protsessa kondensatsii neazeotropnykh smesei kholodil'nykh agentov R142b – R22 na gorizonta'noi trube [Processing results of experimental studies of condensation process of non-azeotropic mixtures of refrigerants R142b - R22 on horizontal pipe]. *Sbornik Sankt-Peterburgskoi gosudarstvennoi akademii kholoda i pishchevykh tekhnologii*. Saint-Petersburg, Izd-vo SPGAKhiPT, 1994. Pp. 82-86
5. Bukin V. G., Shurshev V. F., Danilova G. N., Lebedkina I. K. Vliianie kontsentratsii na teploobmen pri kipenii smesi kholodil'nykh agentov R22/R142b [Influence of concentration on heat transfer during boiling mixture of refrigerants R22 / R142b]. *Teplofizicheskie svoystva kholodil'nykh agentov i protsessy teplomassoobmena: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov*. Saint-Petersburg, Izd-vo SPGAKhiPT, 1996. Pp. 68-71.
6. Bukin V. G., Kuz'min A. Iu., Ezhov A. V. T –  $\xi$ , i –  $\xi$  i T – S diagrammy dlia smesi R22/R142b [T -  $\xi$ , i -  $\xi$  and T - S diagrams for mixture R22 / R142b. Refrigeration equipment in Russia. State and prospects on eve of XXI century]. *Kholodil'naia tekhnika Rossii. Sostoianie i perspektivy nakanune XXI veka: sbornik nauchnykh trudov*. Saint-Petersburg, Izd-vo SPGAKhiPT, 1998. Pp. 14-15.
7. Bukin V. G., Kuz'min A. Iu., Ezhov A. V. Teplovye diagrammy smesi kholodil'nykh agentov R22/R142b [Thermal diagrams of R22 / R142b refrigerant mixture]. *Svoystva rabochikh veshchestv i protsessy teplomassoobmena v kholodil'nykh ustanovkakh: mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov*. Saint-Petersburg, Izd-vo SPGAKhiPT, 2000. Pp. 32-34.
8. Rebrov P. N., Bukin V. G. Issledovanie teplootdachi freona R22 v zatoplennykh ispariteliakh krupnykh freonovykh turbokompressornykh kholodil'nykh ustanovok [Investigation of heat transfer of R22 freon in flooded evaporators of large freon turbocompressor refrigeration units]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 1 (63), pp. 45-49.
9. Bukin V. G., Shurshev V. F., Danilova G. N. Eksperimental'noe issledovanie teploobmena smesi R22/R142b v ispariteliakh kholodil'nykh mashin [Experimental study of heat transfer of R22 / R142b mixture in evaporators of refrigeration machines]. *Kholodil'naia tekhnika*, 1996, no. 3, pp. 10-11.

The article submitted to the editors 21.07.2020

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

**Ezhov Alexey Vasilievich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department of Power Engineering and Refrigerating Machines; bukinvg@mail.ru.

**Andreev Aleksander Ivanovich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Master's Course Student of the Department of Heat-Power Engineering and Refrigerating Machines; aresut79@mail.ru.

