

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ АБСОРБЦИОННЫХ БРОМИСТО-ЛИТИЕВЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

О. С. Малинина, А. В. Бараненко

Университет ИТМО,
Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Проведен анализ энергетической эффективности действительных термодинамических циклов абсорбционных бромисто-литиевых холодильных машин (АБХМ) с одно- и многоступенчатыми процессами абсорбции и генерации и со связанным потоком массы. Выполнен анализ влияния температуры греющего и охлаждающего источников на тепловой коэффициент. Определены параметры внешних источников, при которых возможно осуществление названных термодинамических циклов. При этом для циклов с двухступенчатыми процессами абсорбции и генерации требуется греющий источник с температурой на 20–24 °С ниже в сравнении с базовым одноступенчатым циклом, а для цикла с трехступенчатыми процессами — ниже на 27–30 °С. Установлено, что при принятых параметрах внешних источников действительный тепловой коэффициент находится в пределах: для одноступенчатой АБХМ 0,68–0,74, для двухступенчатой АБХМ 0,36–0,39 и для трехступенчатой АБХМ 0,24–0,26.

Ключевые слова: эффективность, действительный термодинамический цикл, абсорбционная бромисто-литиевая холодильная машина, связанный поток массы, тепловой коэффициент.

Введение

Абсорбционные бромисто-литиевые холодильные машины (АБХМ) получили широкое распространение в системах охлаждения основных технологий, комфортного и технологического кондиционирования в химической, нефтеперерабатывающей, электронной, пищевой промышленности, в жилищно-коммунальном секторе и социальной сфере. Для работы АБХМ используют возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и вторичные энергетические ресурсы (ВЭР), что находится в тренде развития мировой энергетики, ориентированной на увеличение доли названных ресурсов в энергобалансе с целью повышения энергоэффективности и снижения углеродоемкости мировой экономики [1].

В настоящее время АБХМ уделяется повышенное внимание [2–8]. Результаты исследований систем охлаждения и кондиционирования воздуха с использованием абсорбционных бромисто-литиевых холодильных машин на солнечной энергии и ВЭР представлены в работах [2, 4, 8–14].

Анализ термодинамических циклов АБХМ рассмотрен в ряде исследований [11, 12, 15, 16–21]. Одноступенчатый цикл имеет наибольшее распространение, и поэтому является базовым. Изучение возможностей других циклов, определение их преимуществ удобнее всего вести в сопоставлении с одноступенчатым базовым циклом. Термодинамические циклы АБХМ, включающие в себя многоступенчатую абсорбцию,

а также одновременно многоступенчатые абсорбцию и генерацию раствора могут быть осуществлены посредством внешне связанных процессов переноса теплоты или массы. Данные циклы осуществляются в области более низких концентраций раствора в сравнении с циклом с двухступенчатой генерацией. Это уменьшает опасность кристаллизации раствора при эксплуатации АБХМ. При прочих равных параметрах для осуществления этих циклов требуется меньшая температура греющего источника в сравнении с базовым циклом. Поэтому в таких циклах возможно эффективное использование в качестве греющей среды низкотемпературных ВЭР и энергии солнца. Названные положительные качества этих циклов свидетельствуют об актуальности их изучения.

Методы исследования

В работе выполнено исследование термодинамических циклов с одно- и многоступенчатыми процессами абсорбции и генерации раствора с внешне связанным потоком массы.

Действительный термодинамический одноступенчатый цикл абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины представлен на рис. 1.

Основные процессы термодинамического цикла: 1–1' — кипение рабочего вещества в испарителе; 2–7 — нагрев слабого раствора в теплообменнике растворов; 7–5 — адиабатно-изобарная десорбция пара рабочего вещества; 5–4 — кипение раствора в генераторе; 4–8 —

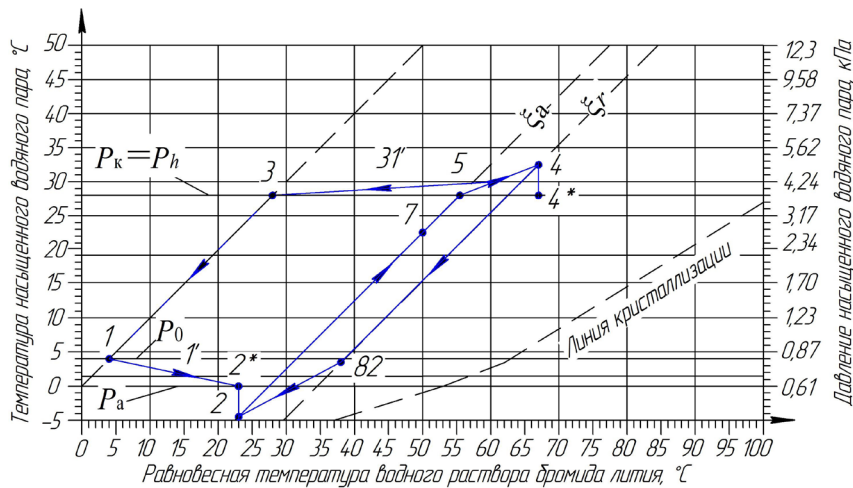


Рис. 1. Термодинамический цикл одноступенчатой АБХМ
 Fig. 1. The thermodynamic cycle of a single-stage Absorption Bromine Lithium Refrigeration Machine (ABLRM)

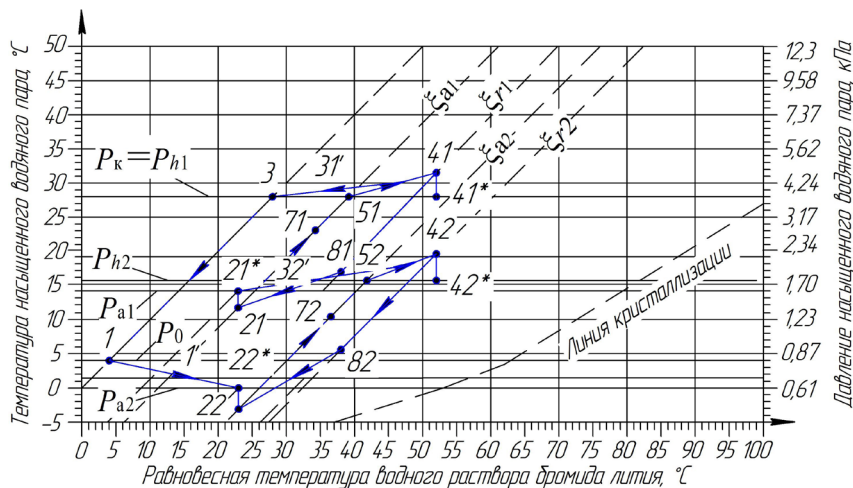


Рис. 2. Термодинамический цикл АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и двухступенчатой генерацией раствора с внешне связанным потоком массы
 Fig. 2. The thermodynamic cycle of a ABLRM with two-stage absorption and two-stage solution generation with an externally coupled mass flow

охлаждение крепкого раствора в теплообменнике растворов; 8–2 — адиабатно-изобарная абсорбция пара рабочего вещества в абсорбере; 3'–3 — отвод теплоты перегрева и конденсация пара рабочего вещества в конденсаторе.

На рис. 2 показан действительный термодинамический цикл абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины с двухступенчатой абсорбцией и двухступенчатой генерацией раствора с внешне связанным потоком массы (двухступенчатая АБХМ). В цикле два контура циркуляции раствора: высокотемпературный 51–41–81–21 и низкотемпературный 52–42–82–22. Внешне связанный процесс переноса массы осуществляется между генератором низкой (второй) ступени и абсорбером высокой (первой) ступени. Пар хладагента, выпариваемый в генераторе низкого давления, абсорбируется в абсорбере высокого давления.

Основные процессы термодинамического цикла: 1–1' — кипение рабочего вещества в испарителе; 22–72 — нагрев слабого раствора в теплообменнике растворов второй ступени; 72–52 — адиабатно-изобарная десорбция пара рабочего вещества; 52–42 — кипение раствора в генераторе второй ступени; 42–82 — охлаждение крепкого раствора в теплообменнике растворов второй ступени; 82–22 — адиабатно-изобарная абсорбция пара рабочего вещества в абсорбере второй ступени; 21–71 — нагрев слабого раствора в теплообменнике растворов первой ступени; 71–51 — адиабатно-изобарная десорбция пара рабочего вещества; 51–41 — кипение раствора в генераторе первой ступени; 41–81 — охлаждение крепкого раствора в теплообменнике растворов первой ступени; 81–21 — адиабатно-изобарная абсорбция пара рабочего вещества в абсорбере первой ступени;

3'–3 — отвод теплоты перегрева и конденсация пара рабочего вещества в конденсаторе.

Действительный термодинамический цикл абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины с трехступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией раствора с внешне связанным потоком массы (трехступенчатая АБХМ) изображен на рис. 3. В цикле три контура циркуляции раствора. Внешне связанные потоки массы — пары хладагента из генераторов третьей и второй ступеней абсорбируются в абсорберах соответственно второй и первой ступеней.

Основные процессы термодинамического цикла: 1–1' — кипение рабочего вещества в испарителе; 23–73 — нагрев слабого раствора в теплообменнике растворов третьей ступени; 73–53 — адиабатно-изобарная десорбция пара рабочего вещества; 53–43 — кипение раствора в генераторе третьей ступени; 43–83 — охлаждение крепкого раствора в теплообменнике растворов третьей ступени; 83–23 — адиабатно-изобарная абсорбция пара рабочего вещества в абсорбере третьей ступени; 22–72 — нагрев слабого раствора в теплообменнике растворов второй ступени; 72–52 — адиабатно-изобарная десорбция пара рабочего вещества; 52–42 — кипение раствора в генераторе второй ступени; 42–82 — охлаждение крепкого раствора в теплообменнике растворов второй ступени; 82–22 — адиабатно-изобарная абсорбция пара рабочего вещества в абсорбере второй ступени 21–71 — нагрев слабого раствора в теплообменнике растворов первой ступени; 71–51 — адиабатно-изобарная десорбция пара рабочего вещества; 51–41 — кипение раствора в генераторе первой ступени; 41–81 — охлаждение крепкого раствора в теплообменнике растворов первой ступени; 81–21 — адиабатно-изобарная абсорбция пара рабочего вещества в абсорбере первой ступени; 3'–3 — отвод теплоты перегрева и конденсация пара рабочего вещества в конденсаторе.

Методика расчета

Удельный тепловой поток генератора одноступенчатой АБХМ, кДж/кг

$$q_h = h_{3'} + (a - 1)h_4 - a \cdot h_7, \quad (1)$$

где a — кратность циркуляции, кг/кг.

Удельный тепловой поток генераторов многоступенчатых АБХМ, кДж/кг

— третья ступень

$$q_{h3} = h_{33'} + (a_3 - 1)h_{43} - a_3 \cdot h_{73}; \quad (2)$$

— вторая ступень

$$q_{h2} = h_{32'} + (a_2 - 1)h_{42} - a_2 \cdot h_{72}; \quad (3)$$

— первая ступень

$$q_{h1} = h_{31'} + (a_1 - 1)h_{41} - a_1 \cdot h_{71}. \quad (4)$$

Удельный тепловой поток абсорбера одноступенчатой АБХМ, кДж/кг

$$q_a = h_{1'} + (a - 1)h_8 - a_2 \cdot h_2. \quad (5)$$

Удельный тепловой поток абсорберов многоступенчатых АБХМ, кДж/кг

— третья ступень

$$q_{a3} = h_{1'} + (a_3 - 1)h_{83} - a_3 \cdot h_{23}; \quad (6)$$

— вторая ступень

$$q_{a2} = h_{33'} + (a_2 - 1)h_{82} - a_2 \cdot h_{22}; \quad (7)$$

— первая ступень

$$q_{a1} = h_{32'} + (a_1 - 1)h_{81} - a_1 \cdot h_{21}. \quad (8)$$

Удельный тепловой поток испарителя одноступенчатой и многоступенчатых АБХМ, кДж/кг

$$q_0 = h_{1'} - h_3. \quad (9)$$

Удельный тепловой поток конденсатора одноступенчатой АБХМ, кДж/кг

$$q_k = h_{3'} - h_3. \quad (10)$$

Удельный тепловой поток конденсатора многоступенчатых АБХМ, кДж/кг

$$q_k = h_{31'} - h_3. \quad (11)$$

Тепловой коэффициент одноступенчатой АБХМ, кДж/кг

$$\zeta = \frac{Q_0}{Q_h}. \quad (12)$$

Тепловой коэффициент двухступенчатой АБХМ, кДж/кг

$$\zeta = \frac{Q_0}{Q_{h1} + Q_{h2}}. \quad (13)$$

Тепловой коэффициент трехступенчатой АБХМ, кДж/кг

$$\zeta = \frac{Q_0}{Q_{h1} + Q_{h2} + Q_{h3}}. \quad (14)$$

Результаты исследования

Для сравнительного анализа эффективности термодинамических циклов при различных схемных решениях АБХМ в зависимости от различных параметров внешних источников был разработан программный комплекс, созданный при помощи компилятора gfortran. Данная математическая модель позволяет рассчитывать термодинамические циклы АБХМ с одно- и многоступенчатыми процессами абсорбции и генерации в широком диапазоне изменения параметров внешних источников. Программный комплекс состоит из головной программы и ряда подпрограмм. Ввод исходных данных и вывод резуль-

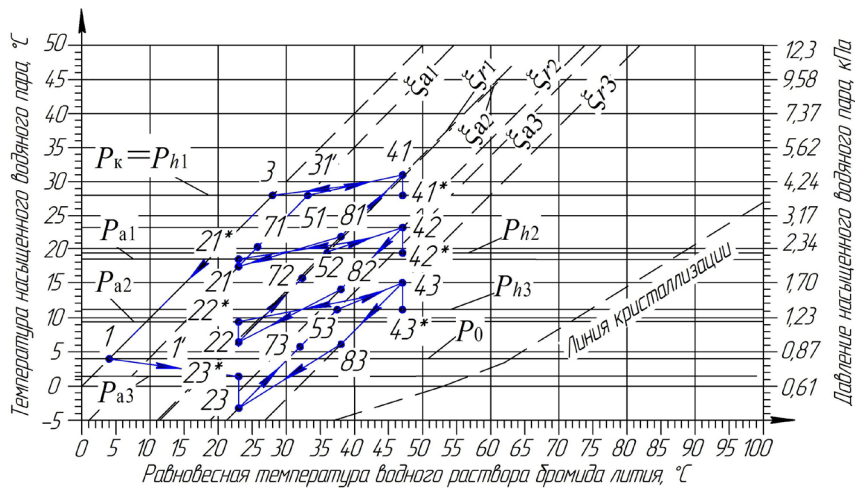


Рис. 3. Термодинамический цикл АБХМ с трехступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией раствора с внешне связанным потоком массы
 Fig. 3. The thermodynamic cycle of a ABLRM with three-stage absorption and three-stage solution generation with an externally coupled mass flow

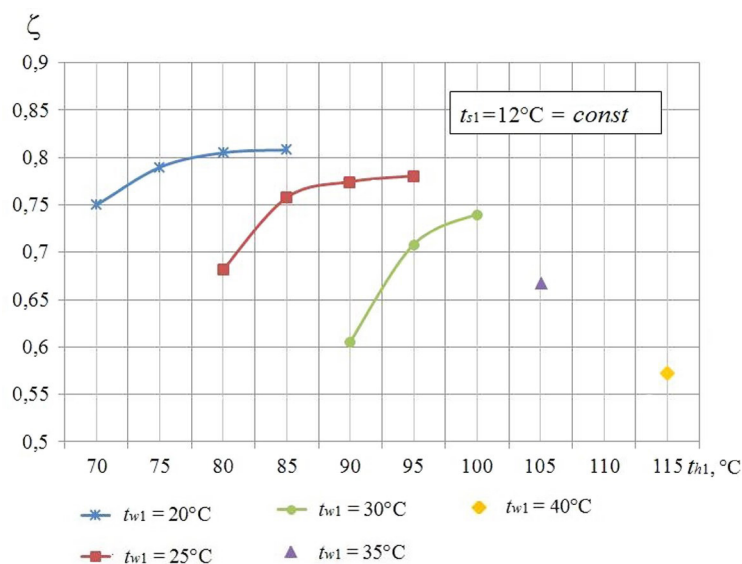


Рис. 4. График зависимости теплового коэффициента одноступенчатой АБХМ от температуры греющего и охлаждающего источников
 Fig. 4. Dependence of the coefficient of performance of a single-stage ABLRM from the temperature of heating and cooling sources

татов осуществляется отдельными файлами. Разработанная комплексная математическая модель включает в себя следующие подпрограммы: расчет параметров точек термодинамических циклов; расчет тепловых нагрузок на аппараты; определение теплового коэффициента. Термодинамические свойства водяного пара, воды и водного раствора бромистого лития [22–24] определялись по уравнениям [25].

Расчеты выполнялись при следующих исходных данных: температура охлаждаемого источника $t_{s1} = 12^\circ\text{C}$, температура охлаждающего источника составила $t_{w1} = t_{wk1} = t_{wa11} = t_{wa12} = t_{wa13} = 20; 25; 30; 35; 40^\circ\text{C}$, температура греющего источника варьировалась в пределах $t_{h1} = t_{h11} = t_{h12} = t_{h13} (45 - 120)^\circ\text{C}$, необратимые потери действительного цикла были приняты согласно рекомендациям, изложенным в литературе [25]

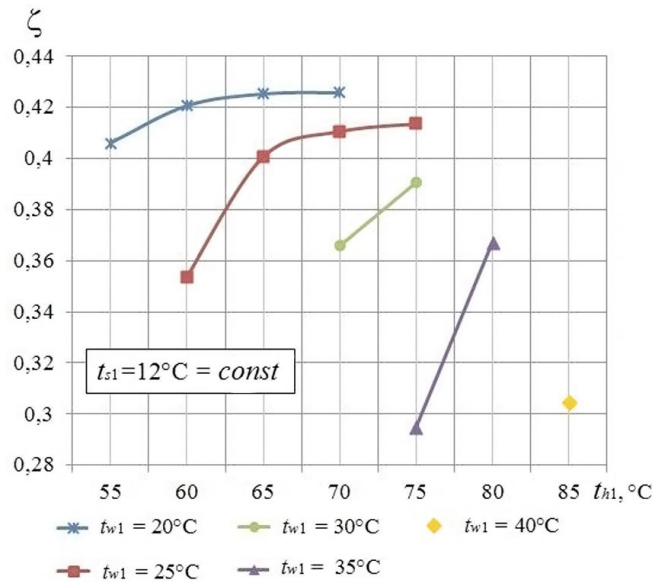


Рис. 5. График зависимости теплового коэффициента двухступенчатой АБХМ от температуры греющего и охлаждающего источников
Fig. 5. Dependence of the coefficient of performance of a two-stage ABLRM from the temperature of heating and cooling sources

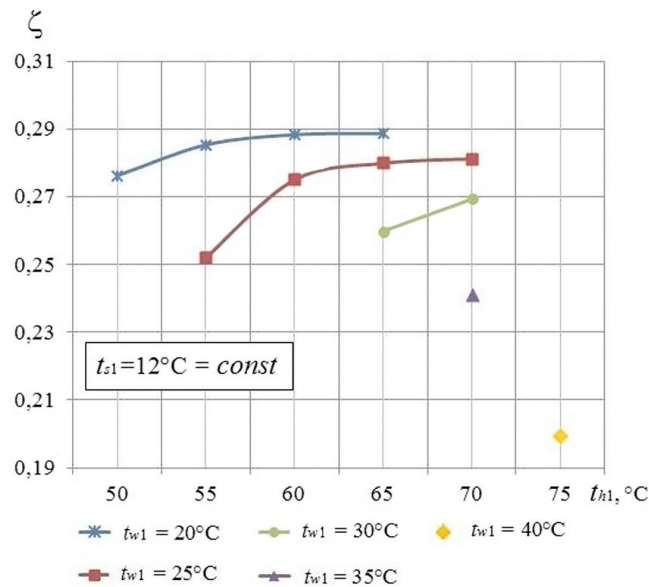


Рис. 6. График зависимости теплового коэффициента трехступенчатой АБХМ от температуры греющего и охлаждающего источников
Fig. 6. Dependence of the coefficient of performance of a three-stage ABLRM from the temperature of heating and cooling sources

и составили: недорекуперация теплоты на теплой стороне конденсатора $\Delta t_k = 3^\circ\text{C}$, на холодной стороне испарителя $\Delta t_{и} = 3^\circ\text{C}$, на теплой стороне генератора $\Delta t_r = 3^\circ\text{C}$, на холодной стороне абсорбера $\Delta t_a = 3^\circ\text{C}$, на холодной стороне теплообменника растворов $\Delta t_{т.о} = 15^\circ\text{C}$, недовыпаривание крепкого раствора в генераторе $\Delta \xi_r = 2,5\%$, недонасыщение слабого раствора в абсорбере $\Delta \xi_a = 1,5\%$, гидравлическое сопротивление

при прохождении пара из испарителя в абсорбер $\Delta p_{и-а} = 0,13$ кПа.

Результаты расчета одноступенчатой АБХМ представлены на рис. 4.

В результате расчета установлено, что одноступенчатый цикл при условии недопущения кристаллизации раствора осуществим при температуре греющего источника $t_{h1} = (70 - 115)^\circ\text{C}$, температура охлаждающей воды t_{w1} должна быть

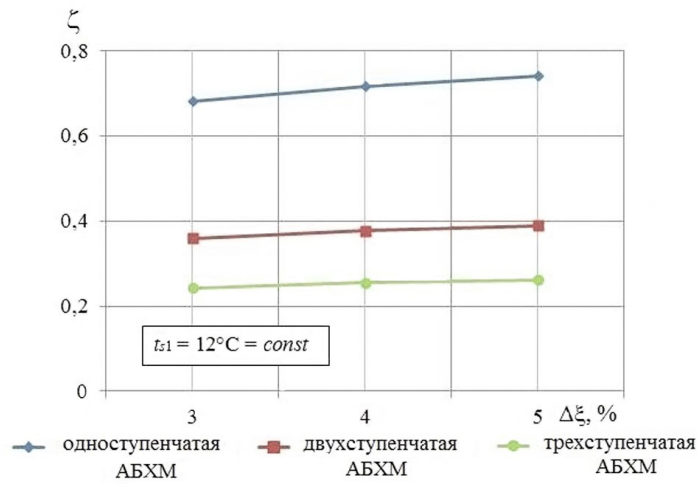


Рис. 7. График зависимости теплового коэффициента от зоны дегазации
Fig. 7. Dependence of the coefficient of performance from the degassing zone

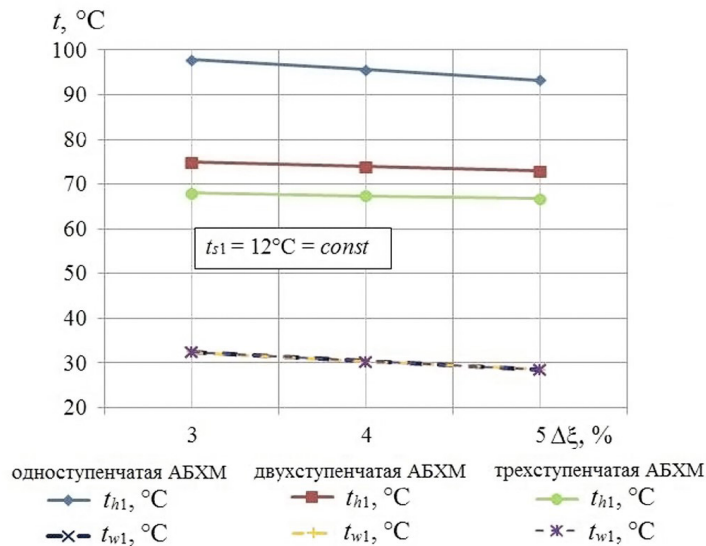


Рис. 8. График зависимости температуры греющего и охлаждающего источников от зоны дегазации
Fig. 8. Dependence of the temperature of heating and cooling sources from the degassing zone

не более 40°C. При этом действительный тепловой коэффициент цикла находится в пределах $\zeta = 0,57 - 0,81$.

Результаты расчета двухступенчатой АБХМ представлены на рис. 5.

В результате расчета установлено, что одноступенчатый цикл при условии недопущения кристаллизации раствора осуществим при температуре греющего источника $t_{h1} = (55 - 85)^\circ\text{C}$, температура охлаждающей воды t_{w1} должна быть

не более 40°C. При этом действительный тепловой коэффициент цикла находится в пределах $\zeta = 0,30 - 0,43$.

Результаты расчета трехступенчатой АБХМ представлены на рис. 6.

В результате расчета установлено, что одноступенчатый цикл при условии недопущения кристаллизации раствора осуществим при температуре греющего источника $t_{h1} = (50 - 75)^\circ\text{C}$, температура охлаждающей воды t_{w1} должна быть

не более 40 °С. При этом действительный тепловой коэффициент цикла находится в пределах $\zeta = 0,2 - 0,29$.

При проведении исследования выяснилось, что зона дегазации в некоторых циклах достигала $\Delta\xi = 22\%$, что свойственно теоретическим циклам, поэтому были выполнены расчеты с учетом реальных значений зоны дегазации. Как правило, в действительных циклах зона дегазации составляет $\Delta\xi = (3 - 5)\%$. Результаты данного расчета приведены на рис. 7 и 8.

Из графика на рис. 7 видно, что с учетом реальных значений зоны дегазации действительный тепловой коэффициент находится в пределах: для одноступенчатой АБХМ $\zeta = 0,68 - 0,74$, для двухступенчатой АБХМ $\zeta = 0,36 - 0,39$ и для трехступенчатой АБХМ $\zeta = 0,24 - 0,26$.

Из графика на рис. 8 видно, что для реальных значений зоны дегазации циклы осуществимы при температуре охлаждающей среды $t_{w1} = (28,5 - 32,4)^\circ\text{C}$ и температурах греющего источника для одноступенчатой АБХМ $t_{h1} = (93,3 - 97,9)^\circ\text{C}$, для двухступенчатой АБХМ $t_{h1} = (73,0 - 75,0)^\circ\text{C}$, для трехступенчатой АБХМ $t_{h1} = (66,8 - 68,1)^\circ\text{C}$.

Выводы

В результате проведенного исследования, установлено, что изучаемые циклы при условии недопущения кристаллизации раствора и с учетом реальных значений зоны дегазации, а также при величине температуры охлаждаемой воды $t_{s1} = 12^\circ\text{C}$ осуществимы при температуре охлаждающей среды $t_{w1} = (28,5 - 32,4)^\circ\text{C}$, температура греющего источника должна составлять: для одноступенчатой АБХМ $t_{h1} = (93,3 - 97,9)^\circ\text{C}$, для двухступенчатой АБХМ $t_{h1} = (73,0 - 75,0)^\circ\text{C}$, для трехступенчатой АБХМ $t_{h1} = (66,8 - 68,1)^\circ\text{C}$. Действительный тепловой коэффициент находится в пределах: для одноступенчатой АБХМ $\zeta = 0,68 - 0,74$, для двухступенчатой АБХМ $\zeta = 0,36 - 0,39$ и для трехступенчатой АБХМ $\zeta = 0,24 - 0,26$.

Список источников

1. Global Energy & CO₂ Status Report 2018 // International Energy Agency. 2019. URL: <https://nangs.org/analytics/iea-global-energy-co2-status-report-eng-pdf> (дата обращения: 26.01.2020).
2. Bujedo L. A., Rodriguez J., Martinez P. J. Experimental results of different control strategies in a solar air-conditioning system at part load // *Solar Energy*. 2011. Vol. 85 (7). P. 1302–1315. DOI: 10.1016/j.solener.2011.03.009.
3. Lizarte R., Izquierdo M., Marcos J. D., Palacios E. An innovative solar-driven directly air-cooled LiBr-H₂O absorption chiller prototype for residential use // *Energy Build.* 2012. Vol. 47. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.11.011.
4. Ketfi O., Merzouk M., Merzouk N. K., Bourouis M. Feasibility study and performance evaluation of low capacity water–LiBr absorption cooling systems functioning in different Algerian climate zones // *International Journal of Refrigeration*. 2017. Vol. 82. P. 36–50. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.07.002.
5. Chena J. F., Daia Y. J., Wang H. B. [et al.]. Experimental investigation on a novel air-cooled single effect LiBr-H₂O absorption chiller with adiabatic flash evaporator and adiabatic absorber for residential application // *Solar Energy*. 2018. Vol. 159. P. 579–587. DOI: 10.1016/j.solener.2017.11.029.
6. Sabbagh A. A., Gymez J. M. Optimal control of single stage LiBr/water absorption chiller // *International Journal of Refrigeration*. 2018. Vol. 92. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.05.007.
7. Shiue A., Hu S., Chiang K. Effect of operating variables on performance of an absorption chiller driven by heat from municipal solid waste incineration // *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2018. Vol. 27. P. 134–140. DOI: 10.1016/j.seta.2018.04.008.
8. Al-Ugla A. A., El-Shaarawi M. A. I., Said S. A. M. Alternative designs for a 24-hours operating solarpowered LiBr-water absorption air-conditioning technology // *International Journal of Refrigeration*. 2015. Vol. 53. P. 90–100. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.01.010.
9. Li M., Xu C., Hassanien R. H. E. [et al.]. Experimental investigation on the performance of a solar powered lithium bromide–water absorption cooling system // *International Journal of Refrigeration*. 2016. Vol. 71, P. 46–59. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2016.07.023.
10. Lubis A., Jeong J., Giannetti N. [et al.]. Operation performance enhancement of single-double-effect absorption chiller // *Applied Energy*. 2018. Vol. 219. P. 299–311. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.046.
11. Xu Z. Y., Wang R. Z. Comparison of CPC driven solar absorption cooling systems with single, double and variable effect absorption chillers // *Solar Energy*. 2017. Vol. 158. P. 511–519. DOI: 10.1016/j.solener.2017.10.014.
12. Martínez P. J., Martínez J. C., Martínez P. Performance comparison of solar autonomous and assisted absorption systems in Spain // *International Journal of Refrigeration*. 2016. Vol. 71. P. 85–93. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2016.08.009.
13. Muye J., Ayou D. S., Saravanan R., Coronas A. Performance study of a solar absorption power-cooling system // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 97. P. 59–67. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.09.034.
14. Chahartaghi M., Golmohammadi H., Shojaei A. F. Performance analysis and optimization of new double effect lithium bromide–water absorption chiller with series and parallel flows // *International Journal of Refrigeration*. 2019. Vol. 97. P. 73–87. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.08.011.
15. Sarabia Escriba E. J., Lamas Sivila E. V., Soto Frances V. M. Air conditioning production by a single effect absorption cooling machine directly coupled to a solar collector field. Application to Spanish climates // *Solar Energy*. 2011. Vol. 85. P. 2108–2121. DOI: 10.1016/j.solener.2011.05.019.
16. Xu Z. Y., Wang R. Z. Absorption refrigeration cycles: Categorized based on the cycle construction // *International Journal of Refrigeration*. 2016. Vol. 62. P. 114–136. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.10.007.
17. She X., Yin Y., Xu M., Zhang X. A novel low-grade heat-driven absorption refrigeration system with LiCl-H₂O and LiBr-H₂O working pairs // *International Journal of Refrigeration*. 2015. Vol. 58. P. 219–234. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.06.016.
18. Степанов К. И., Мухин Д. Г., Волкова О. В., Бараненко А. В. Анализ СОР термодинамического цикла АБХМ с двухступенчатой абсорбцией при получении отрицательных температур охлаждения // *Вестник Международной академии холода*. 2016. № 1. С. 86–92. DOI: 10.21047/1606-4313-2016-16-1-86-92.
19. Aprile M., Toppi T., Garone S., Motta M. STACY – A mathematical modelling framework for steady-state simulation of absorption cycles // *International Journal of Refrigeration*. 2018. Vol. 88. P. 129–140. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.12.019.

20. Bowie D., Cruickshank C. A. Experimental evaluation of a triple-state sorption chiller // International Journal of Refrigeration. 2017. Vol. 81. P. 12–25. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.05.009.

21. Izquierdo M., Venegas M., Rodriguez P., Lecuona A. Crystallization as a limit to develop solar air-cooled LiBr–H₂O absorption systems using low-grade heat // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2004. Vol. 81. P. 205–216. DOI: 10.1016/j.solmat.2003.11.002.

22. Ривкин С. А., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980. 424 с.

23. Löwer H. Thermodynamische Eigenschaften und Wärme–Diagramm der binären Systems Lithiumbromid-Wässer // Kältetechnik. 1961. Nu. 5. S. 178–184.

24. Вербя О. И., Груздев В. А., Захаренко Л. Г. [и др.]. Термодинамические свойства водных растворов бромистого лития // Теплофизические свойства растворов. Новосибирск: Изд-во ИТФ СО АН СССР, 1983. С. 19–34.

25. Бараненко А. В., Тимофеевский Л. С., Долотов А. Г., Попов А. В. Абсорбционные преобразователи теплоты: моногр. СПб.: Изд-во СПбГУНиПТ, 2005. 338 с. ISBN 5-89565-116-X.

МАЛИНИНА Ольга Сергеевна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент факультета низкотемпературной энергетики.

SPIN-код; 6840-9272; AuthorID (РИНЦ): 709687

Адрес для переписки: holmash_malinina@mail.ru

БАРАНЕНКО Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), советник при ректорате.

SPIN-код; 5621-0524; AuthorID (РИНЦ): 173759

Адрес для переписки: baranenko@mail.ifmo.ru

Для цитирования

Малинина О. С., Бараненко А. В. Сопоставление эффективности термодинамических циклов абсорбционных бромисто-литиевых холодильных машин // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 2. С. 27–36. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-2-27-36.

Статья поступила в редакцию 03.03.2020 г.

© О. С. Малинина, А. В. Бараненко

EFFICIENCY COMPARISON OF THERMODYNAMIC CYCLES OF LITHIUM BROMIDE-WATER ABSORPTION REFRIGERATION MACHINES

O. S. Malinina, A. V. Baranenko

ITMO University,
Russia, Saint Petersburg, Kronverkskiy Ave., 49, 197101

The energy efficiency analysis of the actual thermodynamic cycles of lithium bromide-water absorption refrigeration machines (ABLRM) with single- and multi-stage processes of absorption and generation and with associated mass flow is carried out. The temperature influence analysis of the heating and cooling sources on the heat coefficient is performed. Parameters of external sources that allow implementation of these thermodynamic cycles are determined. Meanwhile, for cycles with two-stage absorption and generation processes, a heating source with temperature (20–24)°C lower in comparison with the basic single-stage cycle, and for a cycle with three-stage processes—lower by (27–30)°C is required. It has been established that with the accepted parameters of external sources, the actual coefficient of performance is within the limits: for a single-stage ABLRM) it is 0,68–0,74, for a two-stage ABLRM, it is 0,36–0,39 and for a three-stage ABLRM, it is 0,24–0,26.

Keywords: efficiency, actual thermodynamic cycle, lithium bromide-water absorption refrigeration machine (ABLRM), coupled mass flow, coefficient of performance.

References

1. Global Energy & CO₂ Status Report 2018 // International Energy Agency. 2019. URL: <https://nangs.org/analytics/iea-global-energy-co2-status-report-eng-pdf> (accessed: 26.01.2020). (In Engl.).
2. Bujedo L. A., Rodriguez J., Martinez P. J. Experimental results of different control strategies in a solar air-conditioning system at part load // *Solar Energy*. 2011. Vol. 85 (7). P. 1302–1315. DOI: 10.1016/j.solener.2011.03.009. (In Engl.).
3. Lizarte R., Izquierdo M., Marcos J. D., Palacios E. An innovative solar-driven directly air-cooled LiBr-H₂O absorption chiller prototype for residential use // *Energy Build*. 2012. Vol. 47. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.11.011. (In Engl.).
4. Ketfi O., Merzouk M., Merzouk N. K., Bourouis M. Feasibility study and performance evaluation of low capacity water–LiBr absorption cooling systems functioning in different Algerian climate zones // *International Journal of Refrigeration*. 2017. Vol. 82. P. 36–50. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.07.002. (In Engl.).
5. Chena J. F., Daia Y. J., Wang H. B. [et al.]. Experimental investigation on a novel air-cooled single effect LiBr-H₂O absorption chiller with adiabatic flash evaporator and adiabatic absorber for residential application // *Solar Energy*. 2018. Vol. 159. P. 579–587. DOI: 10.1016/j.solener.2017.11.029. (In Engl.).
6. Sabbagh A. A., Gymez J. M., Optimal control of single stage LiBr/water absorption chiller // *International Journal of Refrigeration*. 2018. Vol. 92. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.05.007. (In Engl.).
7. Shiue A., Hu S., Chiang K. Effect of operating variables on performance of an absorption chiller driven by heat from municipal solid waste incineration // *Sustain. Energy Technol. Assess*. 2018. Vol. 27. P. 134–140. DOI: 10.1016/j.seta.2018.04.008. (In Engl.).
8. Al-Ugla A. A., El-Shaarawi M. A. I., Said S. A. M. Alternative designs for a 24-hours operating solarpowered LiBr-water absorption air-conditioning technology // *International Journal of Refrigeration*. 2015. Vol. 53. P. 90–100. (In Engl.).
9. Li M., Xu C., Hassanien R. H. E., Xu Y., Zhuang B. Experimental investigation on the performance of a solar powered lithium bromide – water absorption cooling system // *International Journal of Refrigeration*. 2016. Vol. 71. P. 46–59. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2016.07.023. (In Engl.).
10. Lubis A., Jeong J., Giannetti N. [et al.]. Operation performance enhancement of single-double-effect absorption chiller // *Applied Energy*. 2018. Vol. 219. P. 299–311. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.046. (In Engl.).
11. Xu Z. Y., Wang R. Z. Comparison of CPC driven solar absorption cooling systems with single, double and variable effect absorption chillers // *Solar Energy*. 2017. Vol. 158. P. 511–519. DOI: 10.1016/j.solener.2017.10.014. (In Engl.).
12. Martínez P. J., Martínez J. C., Martínez P. Performance comparison of solar autonomous and assisted absorption systems in Spain // *International Journal of Refrigeration*. 2016. Vol. 71. P. 85–93. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2016.08.009. (In Engl.).
13. Muye J., Ayou D. S., Saravanan R., Coronas A. Performance study of a solar absorption power-cooling system // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 97. P. 59–67. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.09.034. (In Engl.).
14. Chahartaghi M., Golmohammadi H., Shojaei A. F. Performance analysis and optimization of new double effect lithium bromide–water absorption chiller with series and parallel flows // *International Journal of Refrigeration*. 2019. Vol. 97. P. 73–87. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2018.08.011. (In Engl.).
15. Sarabia Escriva E. J., Lamas Sivila E. V., Soto Frances V. M. Air conditioning production by a single effect absorption cooling machine directly coupled to a solar collector

field. Application to Spanish climates // *Solar Energy*. 2011. Vol. 85. P. 2108–2121. DOI: 10.1016/j.solener.2011.05.019. (In Engl.).

16. Xu Z. Y., Wang R. Z. Absorption refrigeration cycles: Categorized based on the cycle construction // *International Journal of Refrigeration*. 2016. Vol. 62. P. 114–136. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.10.007. (In Engl.).

17. She X., Yin Y., Xu M., Zhang X. A novel low-grade heat-driven absorption refrigeration system with LiCl-H₂O and LiBr-H₂O working pairs // *International Journal of Refrigeration*. 2015. Vol. 58. P. 219–234. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.06.016. (In Engl.).

18. Stepanov K. I., Mukhin D. G., Volkova O. V., Baraneko A. V. Analiz COP termodinamicheskogo tsykla ABKHM s dvukhstupenchatoy absorbtsey pri poluchenii otritsatel'nykh temperatur okhlazhdeniya [Analysis of COP thermodynamic cycle LBAC with two-level absorption when obtaining negative temperatures of cooling] // *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. Journal of International Academy of Refrigeration*. 2016. Vol. 1. P. 86–92. DOI: 10.21047/1606-4313-2016-16-1-86-92. (In Russ.).

19. Aprile M., Toppi T., Garone S., Motta M. STACY – A mathematical modelling framework for steady-state simulation of absorption cycles // *International Journal of Refrigeration*. 2018. Vol. 88. P. 129–140. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.12.019. (In Engl.).

20. Bowie D., Cruickshank C. A. Experimental evaluation of a triple-state sorption chiller // *International Journal of Refrigeration*. 2017. Vol. 81. P. 12–25. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.05.009. (In Engl.).

21. Izquierdo M., Venegas M., Rodriguez P., Lecuona A. Crystallization as a limit to develop solar air-cooled LiBr–H₂O absorption systems using low-grade heat // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2004. Vol. 81. P. 205–216. DOI: 10.1016/j.solmat.2003.11.002. (In Engl.).

22. Rivkin S. A., Aleksandrov A. A. Termodinamicheskiye svoystva vody i vodyanogo para [Thermodynamic properties of the water and steam]. Moscow, 1980. 424 p. (In Russ.).

23. Löwer H. Thermodynamische Eigenschaften und Wärme – Diagramm der binären Systems Lithiumbromid-Wässer // *Kältetechnik*. 1961. Nu. 5. S. 178–184. (In Germ.).

24. Verba O. I., Gruzdev V. A., Zakharenko L. G. [et al.]. Termodinamicheskiye svoystva vodnykh rastvorov bromistogo litiya [Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium bromide] // *Teplofizicheskiye svoystva rastvorov [Thermophysical properties of solutions]*. Novosibirsk, 1983. P. 19–34. (In Russ.).

25. Baranenko A. V., Timofeevskiy L. S., Dolotov A. G., Popov A. V. Absorbtsionnye preobrazovateli teploty [Absorption converters of heat]. St. Petersburg, 2005. 338 p. ISBN 5-89565-116-X. (In Russ.).

MALININA Olga Sergeevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Cryogenic Engineering Faculty.

SPIN-code: 6840-9272

AuthorID (RSCI): 709687

Address for correspondence:

holmash_malinina@mail.ru

BARANENKO Aleksandr Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Advisor to Rector's Office.

SPIN-code: 5621-0524

AuthorID (RSCI): 173759

Address for correspondence:

baranenko@mail.ifmo.ru

For citations

Malinina O. S., Baranenko A. V. Efficiency comparison of thermodynamic cycles of lithium bromide-water absorption refrigeration machines // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 2. P. 27–36. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-2-27-36.

Received March 3, 2020.

© O. S. Malinina, A. V. Baranenko