

УДК 621.575

Эффективность циклов одноступенчатой абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины при температуре кипения ниже 0 °С

Д-р техн. наук А. В. БАРАНЕНКО¹

Университет ИТМО

Д. Н. ПОСЫЛИН²

ФЛ «Балтийское молоко» ОАО «ВИММ-БИЛЛЬ-ДАНН»

Канд. техн. наук О. С. МАЛИНИНА³

Университет ИТМО

¹baranenko@mail.ifmo.ru, ²denis.posylin@pepsiko.com, ³holmash_malinina@mail.ru

Использование в абсорбционных бромистолитиевых холодильных машинах (АБХМ) в качестве хладагента водного раствора бромида лития небольшой концентрации по соли позволяет получать температуры кипения ниже 0 °С, что существенно расширяет области применения данных холодильных машин. Методом экстраполяции экспериментальных и расчетных данных, представленных в литературных источниках, определены величины давления пара над раствором для слабоконцентрированного раствора бромида лития при температурах ниже 0 °С. Выполнен анализ энергетической эффективности одноступенчатой абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины, работающей при отрицательной температуре кипения хладагента в испарителе. Построены графические зависимости теплового коэффициента от параметров внешних источников теплоты в широком диапазоне их изменения.

Ключевые слова: низкотемпературная абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина, отрицательная температура кипения, энергетическая эффективность.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 13.09.2017, принята к печати 24.11.2017

doi: 10.21047/1606-4313-2017-16-4-52-58

Ссылка для цитирования:

Бараненко А. В., Посылин Д. Н., Малинина О. С. Эффективность циклов одноступенчатой абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины при температуре кипения ниже 0 °С // Вестник Международной академии холода. 2017. № 4. С. 52–58.

Performance of single-stage absorption lithium bromide refrigerating machine at boiling points below 0 °С

D. Sc. A. V. BARANENKO¹

ITMO University

D. N. POSYLIN²

FL «Baltic milk» of JSC «WIMM-BILL-DANN»

Ph. D. O. S. MALININA³

ITMO University

¹baranenko@mail.ifmo.ru, ²denis.posylin@pepsiko.com, ³holmash_malinina@mail.ru

The use of lithium bromide aqueous solution of low salt concentration as a cooling medium in absorption lithium bromide refrigerating machines allows boiling points below 0 °С that enlarges the field of application for these machines greatly. On the basis of extrapolated experimental data from various sources the values of aqueous tension for lithium bromide solution of low concentration are calculated at temperatures below 0 °С. The analysis of energy efficiency for single-stage absorption lithium bromide refrigerating machine at negative boiling point of the cooling medium in evaporator is carried out. The graphs for the dependencies between coefficient of performance and the wide range of external heat source parameters are given.

Keywords: low-temperature absorption lithium bromide refrigerating machine, negative boiling point, energy efficiency.

Article info:

Received 13/09/2017, accepted 24/11/2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-4-52-58

Article in Russian

For citation:

Baranenko A. V., Posylin D. N., Malinina O. S. Performance of single-stage absorption lithium bromide refrigerating machine at boiling points below 0 °С. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2017. No 4. p. 52–58.

Введение

В настоящее время в пищевой промышленности для различных технологических нужд широкое применение получают абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины (АБХМ), работающие в области отрицательных температур охлаждения [1, 2]. Температура кипения хладагента в испарителе ниже 0°C достигается благодаря использованию в качестве хладагента слабоконцентрированного водного раствора бромистого лития. Поэтому исследование энергетической эффективности низкотемпературных АБХМ является актуальной задачей.

Известно, что основным показателем энергетической эффективности АБХМ является тепловой коэффициент. Кратность циркуляции раствора в цикле также является важным показателем, т. к. с ней связана работа растворного насоса, она учтена в тепловом коэффициенте и отдельно не рассматривается.

$$\zeta = \frac{Q_0}{Q_h},$$

где Q_0 — полная холодопроизводительность, кВт, Q_h — полный тепловой поток генератора, кВт.

Исследованию термодинамических циклов абсорбционных холодильных машин посвящено достаточно большое число работ [3, 4, 5, 6]. Авторы работ отмечают, что наиболее изученным является одноступенчатый цикл и поэтому в термодинамическом анализе циклов он рассматривается как базовый.

Ряд исследований посвящен изучению АБХМ с отрицательными температурами кипения.

В статье [7] авторами предложена конструктивная схема АБХМ, генерирующей холод в отрицательном диапазоне температур, и разработана методика оценки энергетической эффективности цикла с двухступенчатой абсорбцией и одноступенчатой регенерацией раствора. Выполнен анализ влияния температур греющего источника и охлаждаемой жидкости на величину теплового коэффициента. Расчеты проводились при следующих исходных данных: температура охлаждаемой жидкости варьировалась в пределах $t_{s1} = 5 \div -5^\circ\text{C}$, температура греющей среды изменялась в диапазоне $t_{h1} = 90 \div 110^\circ\text{C}$, температура охлаждающей жидкости была принята равной $t_{w1} = 27^\circ\text{C}$. Установлено, что тепловой коэффициент АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и одноступенчатой регенерацией раствора составлял от 0,360 до 0,393.

В работе [8] представлены результаты испытаний действующего промышленного образца АБХМ с одноступенчатой регенерацией раствора с паровым обогревом при низких температур кипения хладагента. В процессе испытаний была реализована работа АБХМ в устойчивом режиме и зарегистрированы основные параметры работы. Испытания действующей промышленной АБХМ показали возможность стабильной работы одноступенчатой холодильной машины с температурой кипения хладагента $1 \div 1,5^\circ\text{C}$ и охлаждением хладоносителя (воды) до $3 \div 4^\circ\text{C}$, при этом тепловой коэффициент машины находился в пределах $0,6 \div 0,65$.

Оценка эффективности невозможна без точных термодинамических данных о свойствах водного раствора бромида лития в области низких концентраций раствора

по соли и отрицательных температур. Экспериментальные данные по термодинамическим и теплофизическим свойствам водного раствора бромида лития в широкой области температур (начиная от 273 K) и концентраций представлена в статьях [9–12]. На основе этих экспериментальных результатов, для упрощения расчетов абсорбционных преобразователей теплоты, другими исследователями были построены расчетные зависимости для определения свойств водного раствора бромида лития, имеющие достаточно низкую погрешность.

Для математической модели и определения энергетических характеристик исследуемой холодильной машины с температурой кипения ниже 0°C в первом приближении возможна экстраполяция имеющихся экспериментальных и расчетных величин.

Одна из самых популярных методик расчета свойств водного раствора бромида лития представлена в литературном источнике [13], применимая для температур от 15 до 166°C . Реже в расчетах циклов используются данные из работ [14–18]. В работе [19] авторами представлены рассчитанные и построенные диаграмма давление-температура-концентрация и энтальпийная диаграмма водного раствора бромистого лития в интервале температур от эвтектической точки $-67,5^\circ\text{C}$ до 190°C . В интервале температур $0 \div 130^\circ\text{C}$ расчеты основаны на экспериментальных данных разных авторов. При температурах выше 130°C и в области отрицательных температур использованы очень ограниченные экспериментальные данные, а в основном — результаты получены методом экстраполяции.

Методы расчета

Рассмотрим методы расчета свойств водного раствора бромида лития, которые имеют наибольшую точность и описывают область в районе 0°C .

В работе [20] предложен расчетный метод, основанный на уравнении полной химической энергии (свободной энергии Гиббса). Для создания уравнений использованы 11 источников экспериментальных данных, включая работы, которые указывались выше. Точность исследования проверена на 1764 независимых вводных точках, в результате средняя погрешность составила: для определения давления насыщенного водяного пара над раствором $3,0\%$, для удельной теплоемкости $0,4\%$ и для удельного объема $0,2\%$. Заявленная точность применима для температур от 5 до 250°C и концентраций бромида лития от 0 до 75% . Основная зависимость свободной энергии Гиббса получена эмпирическим методом последовательных итераций и имеет 42 константы. Производными свободной энергии Гиббса, отнесенными к независимым переменным будут являться функции энтропии, удельного объема и химического потенциала двухкомпонентного раствора.

Наиболее вычислительно эффективен метод, основанный на массиве экспериментальных данных, который предложен в работе [21]. Область применения ограничена температурами от 273 до 500 K и концентрациями бромида лития от 0 до 75% . Погрешности вычислений плотности, давления, изобарной теплоемкости имеют значения $0,5\%$; $2,1\%$; 2% соответственно.

Результаты расчетов

Авторами данной статьи проведена экстраполяция результатов исследований [20, 21] в область отрицательных температур с целью выявления максимальной взаимной погрешности (рис. 1). На основе этой погрешности можно судить о возможности применения этих методов к вычислению характеристик АБХМ с температурой охлаждаемой среды $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Максимальная разность величин давлений, рассчитанных по двум ведущим способам, при температуре выше $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ не превышает 18 кПа, что соответствует погрешности $\sim 5\%$. Т.е. данные методики можно использовать в качестве расчетных для определения свойств раствора бромида лития при отрицательных температурах. Авторы статьи отдали предпочтение расчетному методу исследователя Jaroslav Patec [21]. Погрешность вычислений давления пара над раствором по его формулам меньше, в сравнении с методом Keith Herold [20]. А расчеты величин давления водяного пара над водным раствором бромида лития по формуле Jaroslav Patec дают более высокие значения, что может обеспечить определенный запас для реальной машины, по отношению к результатам расчетного анализа термодинамических циклов.

Для определения давления пара использовались расчетные зависимости, опубликованные в статьях [21, 22].

Давление кипения посоленной воды в испарителе, кПа [21]

$$P_{sol} = f(\xi, T),$$

где T — температура, К.

Молярная доля бромида лития в растворе [21]

$$x = \frac{\frac{\xi}{M_{\text{LiBr}}}}{\frac{\xi}{M_{\text{LiBr}}} + \frac{(1-\xi)}{M_{\text{LiBr}}}},$$

где ξ — массовая доля бромида лития; M_{LiBr} — молярная масса бромида лития, кг/моль.

Температура, относительно которой определяется давление раствора, К [21]

$$\Theta = T - \sum_{i=1}^8 a_i \cdot x^{m_i} \cdot (0,4 - x)^{n_i} \cdot \left(\frac{T}{T_c}\right)^{l_i},$$

где T_c — критическая температура чистой воды, К.

Давление воды на линии насыщения определяется по уравнению, принятому Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара (МАСВВП) [22]

$$P = \left[\frac{2C}{-B + (B^2 - 4 \cdot A \cdot C)^{\frac{1}{2}}} \right]^4,$$

где

$$A = \vartheta^2 + n_1 \cdot \vartheta + n_2$$

$$B = n_3 \cdot \vartheta^2 + n_4 \cdot \vartheta + n_5$$

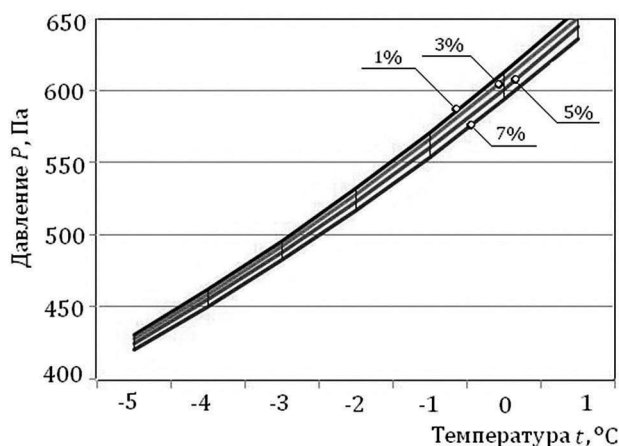
$$C = n_6 \cdot \vartheta^2 + n_7 \cdot \vartheta + n_8$$

$$\vartheta = \Theta + \frac{n_9}{\Theta - n_{10}}$$

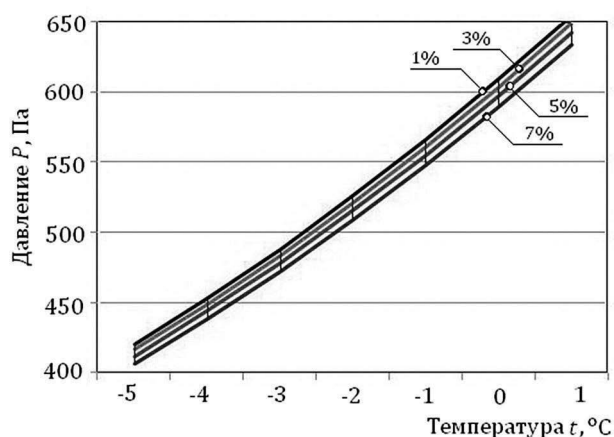
Значения коэффициентов уравнений приведены в табл. 1.

Перейдем к анализу энергетической эффективности действительного цикла низкотемпературной абсорбционной бромида литиевой холодильной машины при различных значениях температур внешних источников теплоты.

На рис. 2 представлена схема низкотемпературной АБХМ с совмещенными процессами тепломассопереноса. Принцип действия и процессы работы абсорбционной бромида литиевой холодильной машины изложены в издании [23].



а



б

Рис. 1. Графики зависимостей давления водного раствора бромида лития от температуры:

а — по формулам Jaroslav Patec; б — по формулам Keith Herold

Fig. 1. The dependence of lithium bromide aqueous solution pressure on temperature: a — calculated with Jaroslav Patec formula; б — calculated with Keith Herold formula

Расчеты выполнялись при следующих исходных данных: температура охлаждающей среды была принята равной $t_{\text{вк1}} = 20; 22; 24; 26; 28; 30$ °С, температура охлаждаемого источника варьировалась в пределах $t_{\text{с1}} = (2 \div 10)$ °С, температура греющего источника была принята равной $t_{\text{н1}} = 95; 100; 105; 110$ °С, концентрация соли водного раствора бромистого лития в воде, кипящей в испарителе, принята равной $\xi_0 = 0; 4; 8\%$, необратимые потери действительного цикла АБХМ выбраны согласно рекомендациям, представленным в литературе [23–25]. Они составили: недорекуперация теплоты на холодной стороне испарителя $\Delta t_{\text{и}} = 3$ °С, недорекуперация теплоты на теплой стороне конденсатора $\Delta t_{\text{к}} = 4$ °С, на холодной стороне абсорбера — $\Delta t_{\text{а}} = 6$ °С, на теплой стороне генератора — $\Delta t_{\text{г}} = 10$ °С, на холодной стороне теплообменника растворов — $\Delta t_{\text{т/о}} = 15$ °С, гидравлическое сопротивление прохождению пара между испарителем и абсорбером $\Delta p = 0,13$ кПа, недовыпаривание крепкого раствора в генераторе $\Delta \xi_{\text{г}} = 2,5\%$, недонасыщение слабого раствора в абсорбере $\Delta \xi_{\text{а}} = 1,5\%$

Расчеты проводились по методике, изложенной в литературных источниках [23–25].

Зона дегазации

$$\Delta \xi = \xi_{\text{г}} - \xi_{\text{а}}$$

где $\xi_{\text{г}}, \xi_{\text{а}}$ — действительные концентрации крепкого и слабого растворов соответственно, %.

Кратность циркуляции раствора

$$a = \frac{\xi_{\text{г}}}{\Delta \xi}$$

Удельный тепловой поток генератора, кДж/кг

$$q_{\text{г}} = i_{3'} + (a - 1) \cdot i_4 - a \cdot i_7$$

Удельный тепловой поток абсорбера, кДж/кг

$$q_{\text{а}} = i_7 + (a - 1) \cdot i_8 - a \cdot i_2$$

Удельный тепловой поток испарителя, кДж/кг

$$q_0 = i_7 - i_3$$

Удельный тепловой поток конденсатора, кДж/кг

$$q_{\text{к}} = i_3 - i_3'$$

Энтальпии в уравнениях для расчета удельных тепловых потоков а аппаратах определяются по параметрам узловых точек действительного цикла одноступенчатой АБХМ (рис. 3)

На рис. 4 и рис. 5 представлены зависимости теплового коэффициента в действительных циклах одноступенчатой АБХМ с совмещенным тепломассопереносом в абсорбере от температуры кипения подсолонной воды в испарителе t_0 , концентрации ξ_0 соли LiBr в ней, температуры греющего источника $t_{\text{н1}}$ и температуры охлаждающей среды $t_{\text{вк1}}$.

Обсуждение результатов расчетов

Изменение величин теплового коэффициента одноступенчатой АБХМ, в зависимости от внешних и внутренних параметров, соответствует известным закономерностям теории холодильных машин [23, 25]. Как

Таблица 1
Значения коэффициентов уравнений

Table 1

Equation coefficients

i	n_i	i	n_i
1	$0,11670521452767 \cdot 10^4$	6	$0,14915108613530 \cdot 10^2$
2	$-0,72421316703206 \cdot 10^6$	7	$-0,48232657361591 \cdot 10^4$
3	$-0,17073846940092 \cdot 10^2$	8	$0,40511340542057 \cdot 10^6$
4	$0,12020824702470 \cdot 10^5$	9	$-0,23855557567849$
5	$-0,32325550322333 \cdot 10^7$	10	$0,65017534844798 \cdot 10^3$

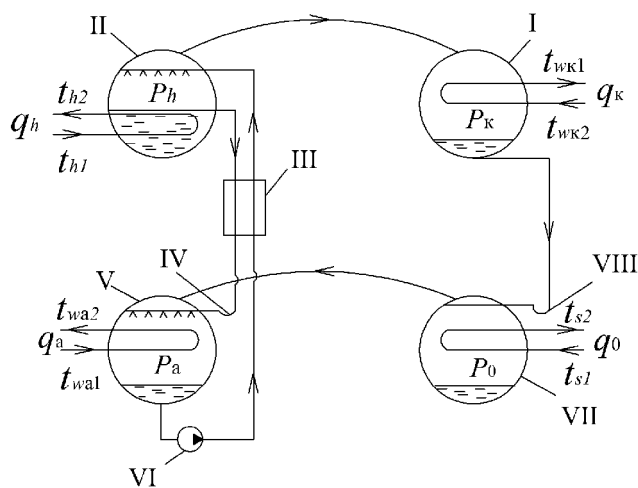


Рис. 2. Схема одноступенчатой абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины: I — конденсатор, II — генератор, III — теплообменник растворов, IV, VIII — гидрозатвор, V — абсорбер, VI — насос, VII — испаритель

Fig. 2. Single-stage absorption lithium bromide refrigerating machine: I — condenser, II — generator, III — solution heat exchanger, IV, VIII — hydraulic lock, V — absorber, VI — pump, VII — evaporator

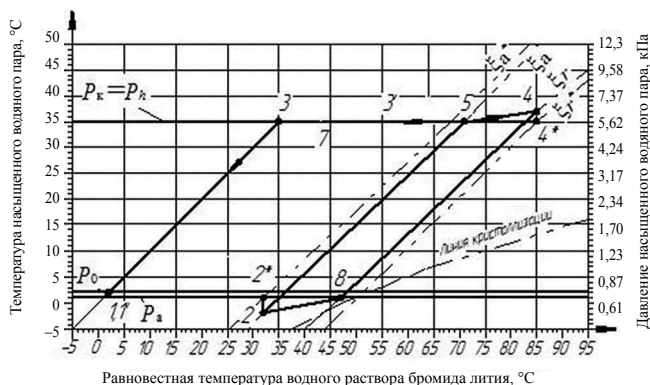


Рис. 3. Цикл одноступенчатой абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины

Fig. 3. The cycle of single-stage absorption lithium bromide refrigerating machine

следует из приведенных графиков, значение теплового коэффициента увеличивается вместе с увеличением температуры греющего источника $t_{\text{н1}}$ и температуры кипения в испарителе t_0 . При этом тепловой коэффициент умень-

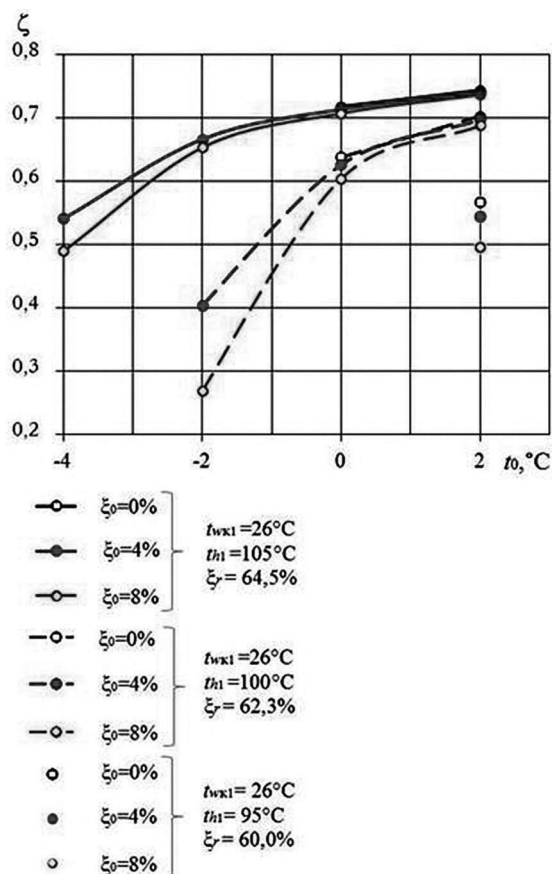


Рис. 4. Графики зависимости теплового коэффициента от температуры кипения подсолненной воды в испарителе t_0
 Fig. 4. The coefficient of performance — salted waiter boiling temperature dependence in evaporator t_0

шается с возрастанием температуры охлаждающей среды t_{wkl} . Относительно низкие величины $\zeta = 0,5-0,57$ при $t_{h1} = 95$ °C (рис. 4) обусловлены большими значениями кратности циркуляции раствора в связи с небольшой разностью концентраций крепкого и слабого растворов (зона дегазации), составляющей лишь 0,9–1,3%. При $t_{h1} = 100$ °C и понижении температуры кипения хладагента от 2 до -2 °C наблюдается резкое уменьшение величин ζ , что также связано с сокращением зоны дегазации и увеличением кратности циркуляции раствора. При $t_0 = -2$ °C зоны дегазации ($\Delta\xi$) составляют лишь 0,6 и 0,3%, при ξ_0 равным 4 и 8%, соответственно. При $t_{h1} = 105$ °C и $t_0 = -2$ °C величины $\Delta\xi$ равны 2,8 и 2,5%.

Очевидно, что при неизменной температуре конденсации повышение температуры греющего источника приводит к увеличению концентрации крепкого раствора. Температуре греющего источника 105 °C соответствует концентрация крепкого раствора $\zeta_r = 64,5\%$. При принятых в расчете условиях теплообмена в аппаратах и номинальной температуре охлаждающей воды 26 °C дальнейшее увеличение температуры греющего источника и соответственно ξ , практически невозможно, поскольку более высокие значения ξ_r будут приводить к кристаллизации крепкого раствора на холодном конце растворного теплообменника.

Естественно, что понижение температуры охлаждающей воды t_{wkl} при неизменных t_0 и t_{h1} приводит к уменьшению концентрации слабого раствора и увеличению

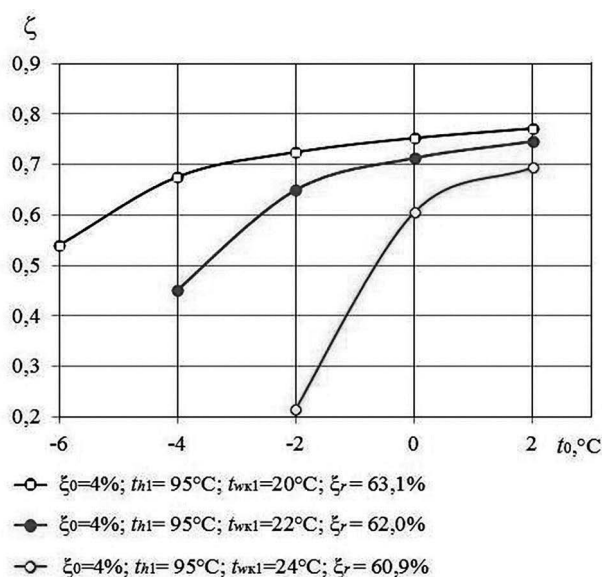


Рис. 5. Графики зависимости теплового коэффициента от температуры кипения подсолненной воды в испарителе t_0
 Fig. 5. The coefficient of performance — salted waiter boiling temperature dependence in evaporator t_0

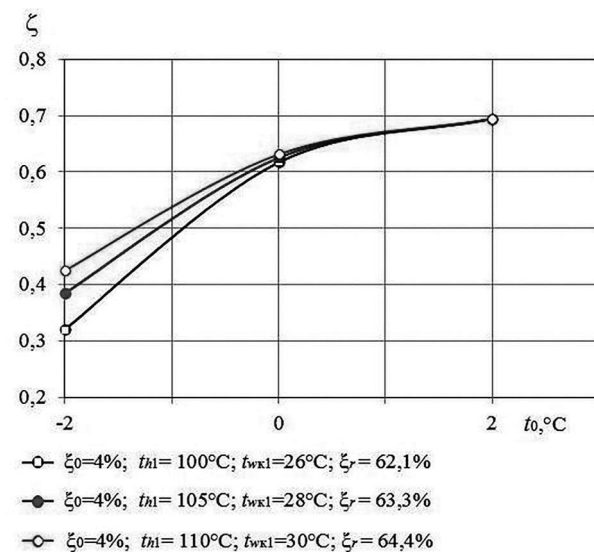


Рис. 6. Графики зависимости теплового коэффициента от температуры кипения подсолненной воды в испарителе t_0
 Fig. 6. The coefficient of performance — salted waiter boiling temperature dependence in evaporator t_0

концентрации крепкого раствора. Поэтому понижение t_{wkl} обуславливает возможность использования греющего источника с более низкой температурой. При $t_{h1} = 95$ °C (рис. 5), $t_0 = -2$ °C, $\xi_0 = 4\%$ и $t_{wkl} = 22$ °C зона дегазации раствора в цикле составляет 2,5%. Повышение t_{wkl} приводит к необходимости использования греющего источника более высокой температуры (рис. 6).

В результате исследования цикла одноступенчатой АБХМ при низких температурах кипения в испарителе, оказалось, что при общепринятых номинальных условиях эксплуатации $t_{wkl} \geq 26$ °C цикл возможно осуществить лишь в узких пределах (рис. 6).

Вывод

На основании проведенного исследования, можно сделать следующий вывод: осуществить цикл одноступенчатой АБХМ при отрицательной температуре рабочего вещества в испарителе возможно до $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако, из энергетических характеристик данной холодильной

машины и необходимости жестких требований к соблюдению режимов эксплуатации следует, что ее реальное применение маловероятно. Тем не менее, учитывая высокие энергетические показатели более сложных циклов можно рассчитывать получение более приемлемых характеристик для этих циклов в условиях температур кипения в испарителе ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Литература

1. Фролкин А. А., Краснов М. И. Применение АБХМ THERMAX в пищевой промышленности // Холодильная техника. 2016. № 2. С. 51–54.
2. Uchida S., Nishiguchi A. Low temperature absorption refrigeration machine with water-LiBr mixed refrigerant. *Int. J. Refrigeration*, 2006. vol. 81, No. 946. P. 618–621.
3. Hisajima D., Kawamura H., Oouchi T. Determination of Thermal Properties of Dilute LiBr-Water Solutions. // *Int. J. of Thermophysics*. 1997. Vol. 18, No. 2. P. 397–406.
4. 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.
5. Xiaohui She, Yonggao Yin, Mengfei Xu, Xiaosong Zhang. 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.
6. Boman D. B., Hoysall D. C., Staedter M. A., Goyal A., Ponkala M. J., Garimella S. A method for comparison of absorption heat pump working pairs. // *International Journal of Refrigeration*, 2017, vol. 77, p. 149–175.
7. Степанов К. И., Мухин Д. Г., Волкова О. В., Бараненко А. В. Анализ COP термодинамического цикла АБХМ с двухступенчатой абсорбцией при получении отрицательных температур охлаждения // Вестник Международной академии холода. 2016. № 1. С. 86–92.
8. Горшков В. Г., Мухин Д. Г., Дзино А. А. Получение низких температур кипения хладагента в абсорбционной бромистолитиевой холодильной машине // Вестник Международной академии холода. 2013. № 4. С. 51–53.
9. Löwer H. Thermodynamische und physikalische Eigenschaften der wässrigen Lithiumbromid-Lösung, PhD thesis, Technischen Hochschule Karlsruhe, 1960.
10. Boryta D. A., Maas A. J., Grant C. B. Pressure — temperature — concentration relationship for system lithium bromide and water (40–70% lithium bromide). // *J Chem. Eng. Data*. 1975, 20 (3) p. 316–319.
11. Renz M. Bestimmung Thermodynamischer Eigenschaften Wässriger und Methylalkoholischer Salzlösungen, Forschungsberichte des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins, 1980, No. 5.
12. Matsuda A., Munakata T., Yoshimaru T., Kubara T., Fuchi H. Measurement of vapor pressures of lithium bromide water solutions. // *Kagaku Kogaku Ronbunshu*. 1980, 6 (2), p. 119–122.
13. Mc Neely L. A. Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium bromide. // *ASHRAE Trans*, 1979, vol. 85, p. 413–434.
14. Kaita Y. Thermodynamic properties of lithium bromide-water solutions at high temperatures. // *International Journal of Refrigeration*, 2001, vol. 24, p. 374–390.
15. Chua H. T., Toh H. T., Malek A., Ng K. C., Srinivasan K. Improved thermodynamic property fields of LiBr — H₂O solution // *International Journal of Refrigeration*, 2000, 23 (6), p. 412–429.

References

1. Frolkin A. A., Krasnov M. I. The use of THERMAX ABHM in the food industry. *Kholodil'naya tekhnika*. 2016. No 2. p. 51–54. (in Russian)
2. Uchida S., Nishiguchi A. Low temperature absorption refrigeration machine with water-LiBr mixed refrigerant. *Int. J. Refrigeration*, 2006. vol. 81, No. 946. P. 618–621.
3. Hisajima D., Kawamura H., Oouchi T. Determination of Thermal Properties of Dilute LiBr-Water Solutions. *Int. J. of Thermophysics*. 1997. Vol. 18, No. 2. P. 397–406.
4. 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.
5. Xiaohui She, Yonggao Yin, Mengfei Xu, Xiaosong Zhang. 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.
6. Boman D. B., Hoysall D. C., Staedter M. A., Goyal A., Ponkala M. J., Garimella S. A method for comparison of absorption heat pump working pairs. *International Journal of Refrigeration*, 2017, vol. 77, p. 149–175.
7. Stepanov K. I., Mukhin D. G., Volkova O. V., Baranenko A. V. Analysis of the thermodynamic cycle COP ABHM with two-stage absorption with a negative temperature cooling. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2016. No 1. p. 86–92. (in Russian)
8. Gorshkov V. G., Mukhin D. G., Dzino A. A. Obtaining low boiling point refrigerant in lithium bromide absorption refrigerating machine. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2013. No 4. p. 51–53. (in Russian)
9. Löwer H. Thermodynamische und physikalische Eigenschaften der wässrigen Lithiumbromid-Lösung, PhD thesis, Technischen Hochschule Karlsruhe, 1960.
10. Boryta D. A., Maas A. J., Grant C. B. Pressure — temperature — concentration relationship for system lithium bromide and water (40–70% lithium bromide). // *J Chem. Eng. Data*. 1975, 20 (3) p. 316–319.
11. Renz M. Bestimmung Thermodynamischer Eigenschaften Wässriger und Methylalkoholischer Salzlösungen, Forschungsberichte des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins, 1980, No. 5.
12. Matsuda A., Munakata T., Yoshimaru T., Kubara T., Fuchi H. Measurement of vapor pressures of lithium bromide water solutions. // *Kagaku Kogaku Ronbunshu*. 1980, 6 (2), p. 119–122.
13. Mc Neely L. A. Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium bromide. // *ASHRAE Trans*, 1979, vol. 85, p. 413–434.
14. Kaita Y. Thermodynamic properties of lithium bromide-water solutions at high temperatures. // *International Journal of Refrigeration*, 2001, vol. 24, p. 374–390.
15. Chua H. T., Toh H. T., Malek A., Ng K. C., Srinivasan K. Improved thermodynamic property fields of LiBr — H₂O solution // *International Journal of Refrigeration*, 2000, 23 (6), p. 412–429.

16. *Ruiter J. P.* Simplified thermodynamic description of mixtures and solution, *International Journal of Refrigeration*, 1990, 13 (4), p. 223–236.
17. *Patterson M. R., Perez-Branco H.* Numerical fits of the properties of lithium bromide-water solutions. // *ASHRAE Trans*, 1988, vol. 94, p. 2379–2388.
18. *Feurecker G., Scharfe J., Greiter I., Frank C., Alefeld G.* Measurement of thermophysical properties of aqueous LiBr solutions at high temperatures and concentrations. // *Proc. Int. Absorp. Heat Pump Conf. ASME*, 1993, vol. 31, p. 493–499.
19. *Караван С. В., Дзино А. А., Караван Д. В., Малышев А. А.* Энтальпийная диаграмма водного раствора бромида лития // *Вестник Международной академии холода*. 2012. № 3. С. 36–38.
20. *Yuan, Z., Herold, K. E.* Thermodynamic Properties of Aqueous Lithium Bromide Using a Multiproperty Free Energy Correlation. // *International J. Heating, Ventilating, Air-Conditioning and Refrigeration*, 2005, Vol. 11, No. 3, pp. 377–393.
21. *Patek J., Klomfar J.* A computationally effective formulation of the thermodynamic properties of LiBr — H₂O solution from 273 to 500 K over full composition range. // *International Journal of Refrigeration*, 2006; Vol. 29, pp. 566–578.
22. *Fernández D. P., Goodwin A. R. H., Lemmon E. W., et al.* A Formulation for the Static Permittivity of Water and Steam at Temperatures from 238 K to 873 K at Pressures up to 1200 MPa, Including Derivatives and Debye-Huckel Coefficients // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 1997. Vol. 26. P. 1125–1166.
23. Абсорбционные преобразователи теплоты / А. В. Бараненко, Л. С. Тимофеевский, А. Г. Долотов, А. В. Попов: Монография. — СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. 338 с.
24. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин, тепловых насосов и термотрансформаторов. Ч. 1. Расчет циклов, термодинамических и теплофизических свойств рабочих веществ: Учеб. пособие / Л. С. Тимофеевский, В. И. Пекарев, Н. Н. Бухарин и др. Под ред. Л. С. Тимофеевского. — СПб.: СПбГУНиПТ 2006. 260 с.
25. Холодильные машины: Учебник для студентов втузов специальности «Техника и физика низких температур» / А. В. Бараненко, Н. Н. Бухарин, В. И. Пекарев, Л. С. Тимофеевский; Под общей ред. Л. С. Тимофеевского. — СПб.: Политехника, 2006. 944 с.
16. *Ruiter J. P.* Simplified thermodynamic description of mixtures and solution, *International Journal of Refrigeration*, 1990, 13 (4), p. 223–236.
17. *Patterson M. R., Perez-Branco H.* Numerical fits of the properties of lithium bromide-water solutions. // *ASHRAE Trans*, 1988, vol. 94, p. 2379–2388.
18. *Feurecker G., Scharfe J., Greiter I., Frank C., Alefeld G.* Measurement of thermophysical properties of aqueous LiBr solutions at high temperatures and concentrations. // *Proc. Int. Absorp. Heat Pump Conf. ASME*, 1993, vol. 31, p. 493–499.
19. *Karavan S. V., Dzino A. A., Karavan D. V., Malyshev A. A.* Enthalpy diagram of an aqueous solution of lithium bromide. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2012. No 3. p. 36–38. (in Russian)
20. *Yuan, Z., Herold, K. E.* Thermodynamic Properties of Aqueous Lithium Bromide Using a Multiproperty Free Energy Correlation. *International J. Heating, Ventilating, Air-Conditioning and Refrigeration*, 2005, Vol. 11, No. 3, pp. 377–393.
21. *Patek J., Klomfar J.* A computationally effective formulation of the thermodynamic properties of LiBr — H₂O solution from 273 to 500 K over full composition range. *International Journal of Refrigeration*, 2006; Vol. 29, pp. 566–578.
22. *Fernández D. P., Goodwin A. R. H., Lemmon E. W., et al.* A Formulation for the Static Permittivity of Water and Steam at Temperatures from 238 K to 873 K at Pressures up to 1200 MPa, Including Derivatives and Debye-Huckel Coefficients. *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 1997. Vol. 26. P. 1125–1166.
23. Absorption heat converters. / A. V. Baranenko, L. S. Timofeevskii, A. G. Dolotov, A. V. Popov: monograph. SPb.: SPB-GUNiPT, 2005. 338 p. (in Russian)
24. Thermal and constructive calculations of refrigerating machines, heat pumps and thermotransformers. Part 1. Calculation of cycles, thermodynamic and thermophysical properties of working substances: textbook. / L. S. Timofeevskii, V. I. Pekarev, N. N. Bukharin ets. SPb.: SPB-GUNiPT, 2006. 260 p. (in Russian)
25. Refrigerating machines: Textbook for students of technical colleges, specialty «Technics and physics of low temperatures» / A. V. Baranenko, N. N. Bukharin, V. I. Pekarev, L. S. Timofeevskii; Under the general edition L. S. Timofeevskogo. SPb.: Politekhnik, 2006. 944 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Бараненко Александр Владимирович

д.т. н., профессор, зав. кафедрой холодильной техники и возобновляемой энергетики
Университета ИТМО,
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9,
baranenko@mail.ifmo.ru

Посылин Денис Николаевич

главный инженер ФЛ «Балтийское молоко»
ОАО «ВИММ-БИЛЛЬ-ДАНН»,
194292, Санкт-Петербург, 6-й Верхний пер., 1,
denis.posylin@pepsiko.com

Малинина Ольга Сергеевна

к.т. н., доцент кафедры холодильной техники
и возобновляемой энергетики Университета ИТМО,
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9,
holmash_malinina@mail.ru

Information about authors

Baranenko Aleksandr Vladimirovich

D. Sc., professor, head of Department
of Refrigeration engineering and renewable energy
of ITMO University,
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9,
baranenko@mail.ifmo.ru

Posylin Denis Nikolaevich

chief engineer FL «Baltic milk»
of JSC «WIMM-BILL-DANN»,
194292, Russia, St. Petersburg, 6-th Verkhni per. 1,
denis.posylin@pepsiko.com

Malinina Olga Sergeevna

Ph.D., associate professor of Department of Refrigeration
engineering and renewable energy of ITMO University,
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9,
holmash_malinina@mail.ru