

УДК 621.575

Анализ влияния температуры греющего источника на энергетическую эффективность одноступенчатого термодинамического цикла абсорбционного бромистолитиевого понижающего термотрансформатора

Канд. техн. наук А. А. ДЗИНО¹, канд. техн. наук О. С. МАЛИНИНА²

¹dzinoaa@mail.ru, ²holmash_malinina@mail.ru

Университет ИТМО

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр. 49

Анализируется влияние температуры греющего источника при различной величине степени внутренней регенерации теплоты в одноступенчатых циклах абсорбционного бромистолитиевого понижающего термотрансформатора (АБПНТ) на коэффициент трансформации. Рассмотрены теоретические циклы с полной регенерацией теплоты на холодной стороне регенеративного теплообменника растворов (РТО), при отсутствии РТО и действительные термодинамические циклы с конечной разницей температур между слабым и крепким растворами на холодной стороне регенеративного теплообменника. Эффективность применения АБПНТ обуславливается наличием на объекте надежных источников теплоты высокого потенциала с целью трансформации на необходимый температурный уровень для создания надежного технологического процесса. В промышленном секторе на современном этапе разработана небольшая линейка АБПНТ (например ООО «ОКБ Теплосибмаш»). Дальнейшее развитие практического применения АБПНТ в сторону увеличения мощности и расширения температурных потенциалов требует разработки надежных технико-экономических обоснований.

Ключевые слова: температура греющего источника, абсорбционный бромистолитиевый понижающий термотрансформатор (АБПНТ), степень внутренней регенерации теплоты, коэффициент трансформации.

Информация о статье

Поступила в редакцию 30.06.2016, принята к печати 24.10.2016

doi: 10.21047/1606-4313-2016-15-4-35-39

Ссылка для цитирования

Дзино А. А., Малинина О. С. Анализ влияния температуры греющего источника на энергетическую эффективность одноступенчатого термодинамического цикла абсорбционного бромистолитиевого понижающего термотрансформатора // Вестник Международной академии холода. 2016. № 4. С. 35–39.

The influence of heat source temperature on the energy efficiency of absorption bromine lithium step down thermal transformer

Ph. D. A. A. DZINO¹, Ph. D. O. S. MALININA²

¹dzinoaa@mail.ru, ²holmash_malinina@mail.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The article deals with the influence of heat source temperature at different degrees of internal heat regeneration on the transformer ratio in single-stage cycles of absorption bromine lithium step down thermal transformer. Ideal cycles with full heat regeneration on the cold side of regenerative heat exchanger, without a regenerative heat exchanger, and actual thermodynamic cycles with finite temperature difference between weak and strong solutions on the cold side of regenerative heat exchanger are analyzed. The efficiency of the transformer is due to reliable sources of high-potential heat to transform up to a temperature level necessary for a secure technological process. A narrow array of the transformers in question is available in the industry (e.g. Teplosibnash LLC). The reliable techno-economic justification is necessary to enlarge the area of application for the bromine lithium step down thermal transformers with increased temperature potential and power.

Keywords: heat source temperature, absorption bromine lithium step down thermal transformer, degree of internal heat regeneration, transformer ratio.

Абсорбционные одноступенчатые бромистолитиевые понижающие термотрансформаторы (АБПНТ) можно успешно применять для целей технологического теплоснабжения, отопления зданий и горячего водоснаб-

жения при наличии греющих источников с температурой 100÷150 °С и источников дешевой сбросной теплоты с температурой 20÷40 °С. В процессах трансформации теплоты в понижающем термотрансформаторе получают

теплоту промежуточного температурного потенциала в количестве, превышающем на 50÷70% теплоту греющего источника со сравнительно высокой температурой.

Энергетическая эффективность абсорбционного бромистолитиевого понижающего термотрансформатора оценивается коэффициентом трансформации λ (лямбда). Принятая в обозначении буква греческого алфавита является первой буквой слова «уменьшать» (λίγιστεω) [1]

$$\lambda = \frac{Q_a + Q_k}{Q_h},$$

где $Q_a + Q_k$ — теплопроизводительность АБПНТ, кВт; Q_h — тепловой поток генератора, кВт.

Степень внутренней регенерации теплоты оценивается соотношением

$$\chi = \frac{t_4 - t_8}{t_4 - t_2},$$

где t_4 — высшая температура кипения раствора в генераторе, °C; t_8 — температура крепкого раствора на выходе из теплообменника, °C; t_2 — температура слабого раствора на выходе из абсорбера, °C

В теоретических циклах при полной регенерации теплоты на холодной стороне регенеративного теплообменника ($t_2 = t_8$) и при отсутствии РТО ($t_8 = t_4$) степень внутренней регенерации равна $\chi = 1$ и $\chi = 0$ соответственно. В действительных циклах при конечной разности температур на холодной стороне теплообменника растворов степень внутренней регенерации варьируется в пределах $1 \geq \chi \geq 0$

Традиционная схема АБПНТ с совмещенными процессами тепломассопереноса показана на рис. 1.

В испарителе I (рис. 1) за счет подвода теплоты от охлаждаемого источника в количестве q_0 кипит вода при давлении $p_0 = p_a$. При этом источник охлаждается до температуры t_{s2} . Водяной пар, образовавшийся в испарителе, поступает в абсорбер II, где он абсорбируется

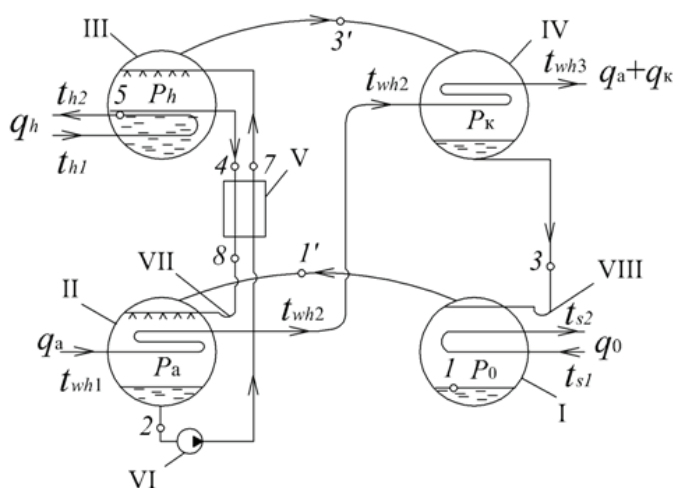


Рис. 1. Схема абсорбционного бромистолитиевого понижающего термотрансформатора:

I — испаритель, II — абсорбер, III — генератор, IV — конденсатор, V — растворный теплообменник, VII, VIII — гидравлические затворы

крепким раствором, стекающим из генератора III через растворный теплообменник V и гидравлический затвор VII в абсорбер. Вследствие абсорбции пара раствором концентрация последнего снижается. Слабый раствор из абсорбера насосом VI подается через растворный теплообменник в генератор, где он кипит при давлении p_h вследствие подвода теплоты от греющего источника в количестве q_h при температуре t_h . Водяной пар, образовавшийся в генераторе, поступает в конденсатор, где конденсируется при давлении p_k . Суммарная теплота абсорбции и конденсации пара отводится к потребителю в количестве $q_a + q_k$ при температуре t_{wh3} . Конденсат из конденсатора стекает в испаритель через гидравлический затвор VIII.

Методика расчета одноступенчатого термодинамического цикла АБПНТ [2]

Зона дегазации, %

$$\Delta\xi = \xi_r - \xi_a,$$

где ξ_r, ξ_a — действительные концентрации крепкого и слабого растворов соответственно.

Кратность циркуляции раствора

$$a = \frac{\xi_r}{\Delta\xi}.$$

Удельный тепловой поток генератора, кДж/кг

$$q_h = i_3' + (a-1) i_4 - a i_7.$$

Удельный тепловой поток абсорбера, кДж/кг

$$q_a = i_1' + (a-1) i_8 - a i_2.$$

Удельный тепловой поток испарителя, кДж/кг

$$q_0 = i_1' - i_3.$$

Удельный тепловой поток конденсатора, кДж/кг

$$q_k = i_3' - i_3.$$

Расчеты выполнялись при следующих исходных данных: температура охлаждаемой воды на входе в испаритель $t_{s1} = 32$ °C, температура нагретой воды на выходе из конденсатора $t_{wh3} = 65$ °C, необратимые потери действительного цикла АБПНТ выбраны согласно рекомендациям, представленным в литературе [2, 3, 4]. Так, например, недорекуперация теплоты на теплой стороне конденсатора $\Delta t_k = 5$ °C, на холодной стороне испарителя $\Delta t_{in} = 5$ °C, на теплой стороне генератора $\Delta t_r = 5$ °C, на теплой стороне абсорбера $\Delta t_a = 5$ °C, недовыпаривание крепкого раствора в генераторе $\Delta\xi_r = 1\%$, недонасыщение слабого раствора в абсорбере $\Delta\xi_a = 1\%$, степень внутренней регенерации теплоты была принята равной: $\chi = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$.

В настоящее время большое количество работ посвящено термодинамическим свойствам воды, водяного пара и водному раствору бромистого лития [5–12].

Таблица 1

Результаты расчета одноступенчатого термодинамического цикла АБПНТ в зависимости от температуры греющего источника при различной степени внутренней регенерации теплоты

Параметр	χ	Температура греющего источника t_h , °C				
		124,0	129,5	135,0	140,5	146
Температура крепкого раствора на выходе из генератора t_4 , °C	0	119	124,5	130	135,5	141
	0,25	119	124,5	130	135,5	141
	0,5	119	124,5	130	135,5	141
	0,75	119	124,5	130	135,5	141
	1	119	124,5	130	135,5	141
Температура крепкого раствора на выходе из регенеративного теплообменника t_8 , °C	0	119	124,5	130	135,5	141
	0,25	104,5	104,5	104,5	104,5	104,5
	0,5	90	90	90	90	90
	0,75	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5
	1	61	61	61	61	61
Действительная концентрация крепкого раствора ξ_r , %	0	59,5	61,7	64,0	66,2	68,5
	0,25	59,5	61,7	64,0	66,2	68,5
	0,5	59,5	61,7	64,0	66,2	68,5
	0,75	59,5	61,7	64,0	66,2	68,5
	1	59,5	61,7	64,0	66,2	68,5
Зона дегазации $\Delta\xi$, %	0	1	3,25	5,5	7,75	10
	0,25	1	3,25	5,5	7,75	10
	0,5	1	3,25	5,5	7,75	10
	0,75	1	3,25	5,5	7,75	10
	1	1	3,25	5,5	7,75	10
Кратность циркуляции раствора a	0	59,5	19,0	11,6	8,5	6,8
	0,25	59,5	19,0	11,6	8,5	6,8
	0,5	59,5	19,0	11,6	8,5	6,8
	0,75	59,5	19,0	11,6	8,5	6,8
	1	59,5	19,0	11,6	8,5	6,8
Удельный тепловой поток теплообменника растворов q_r , кДж / кг	0	0	0	0	0	0
	0,25	1757,3	413,6	164,4	58,1	1,8
	0,5	3497,1	988,4	526,1	327,8	215,2
	0,75	5234,0	1552,3	879,3	590,1	419,3
	1	6949,8	2138,4	1264,0	896,9	694,8
Удельный тепловой поток генератора q_h , кДж / кг	0	9751,3	5136,0	4304,2	3956,6	3795,5
	0,25	7994,0	4558,4	3947,8	3699,2	3565,1
	0,5	6254,2	3983,6	3586,0	3429,5	3351,7
	0,75	4517,3	3419,7	3232,9	3167,2	3147,6
	1	2801,5	2833,6	2848,1	2860,4	2871,9
Удельный тепловой поток абсорбера q_a , кДж / кг	0	9571,3	4945,3	4102,9	3744,7	3573,0
	0,25	7813,9	4367,7	3746,5	3487,3	3342,5
	0,5	6074,1	3793,0	3384,7	3222,1	3129,1
	0,75	4337,3	3229,0	3031,6	2955,3	2925,0
	1	2621,5	2642,9	2646,8	2648,5	2649,4
Удельный тепловой поток конденсатора q_k , кДж / кг	0	2428,5	2439,1	2449,7	2460,3	2471,0
	0,25	2428,5	2439,1	2449,7	2460,3	2471,0
	0,5	2428,5	2439,1	2449,7	2460,3	2471,0
	0,75	2428,5	2439,1	2449,7	2460,3	2471,0
	1	2428,5	2439,1	2449,7	2460,3	2471,0
Коэффициент трансформации λ	0	1,231	1,438	1,522	1,568	1,592
	0,25	1,281	1,493	1,569	1,608	1,631
	0,5	1,359	1,565	1,627	1,656	1,671
	0,75	1,498	1,657	1,695	1,710	1,714
	1	1,803	1,793	1,789	1,786	1,783

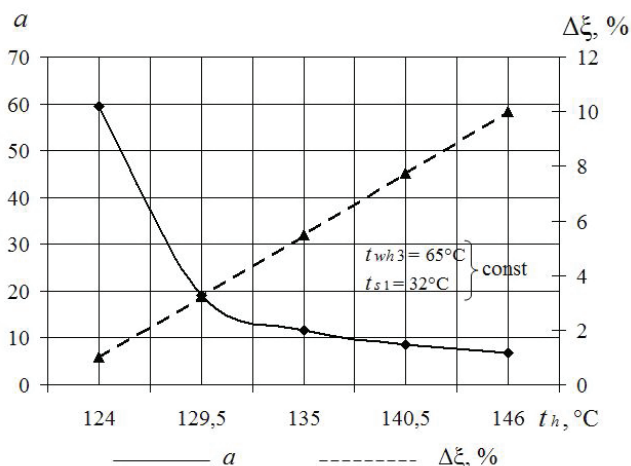


Рис. 2. Зависимость кратности циркуляции и зоны дегазации от температуры греющего источника при различной степени регенерации теплоты в цикле

Расчеты выполнены при помощи математической модели АВРNT, созданному при помощи компилятора GFortran. Термодинамические свойства водяного пара, воды и водного раствора бромистого лития [7, 12] определяли по уравнениям [4].

Минимальная температура греющего источника, при которой можно осуществлять одноступенчатый цикл с зоной дегазации $\Delta\xi \rightarrow 0$ и кратности циркуляции $a \rightarrow \infty$ равна $t_h = 124$ °C. Для дальнейшего исследования были приняты следующие значения величины греющего источника $t_h = 124; 129,5; 135; 140,5; 146$ °C.

При расчете одноступенчатого термодинамического цикла абсорбционного бромистолитиевого понижающего термотрансформатора в зависимости от температуры греющего источника при различной степени внутренней регенерации теплоты были получены следующие результаты: температура конденсации $t_k = 70$ °C; температура кипения $t_0 = 22$ °C; температура слабого раствора на выходе из абсорбера $t_2 = 61$ °C; действительная концентрация слабого раствора $\xi_a = 58,5\%$; удельный тепловой поток испарителя $q_0 = 2848,1$ кДж/кг. Остальные результаты расчета приведены в табл. 1.

По полученным данным были построены графики зависимости кратности циркуляции и зоны дегазации (рис. 2), коэффициента трансформации (рис. 3) от температуры греющего источника при различной степени регенерации теплоты в цикле.

Из графика, показанного на рис. 2 видно, что с увеличением температуры греющего источника происходит уменьшение зоны дегазации, которое в свою очередь приводит к росту кратности циркуляции раствора.

Из проведенного анализа (рис. 3) следует, что в теоретических циклах с полной рекуперацией теплоты на холодной стороне регенеративного теплообменника с увеличением высшей температуры раствора в генераторе коэффициент трансформации уменьшается. Данное явление объясняется тем, что с уменьшением кратности циркуляции увеличивается теплота на теплой стороне

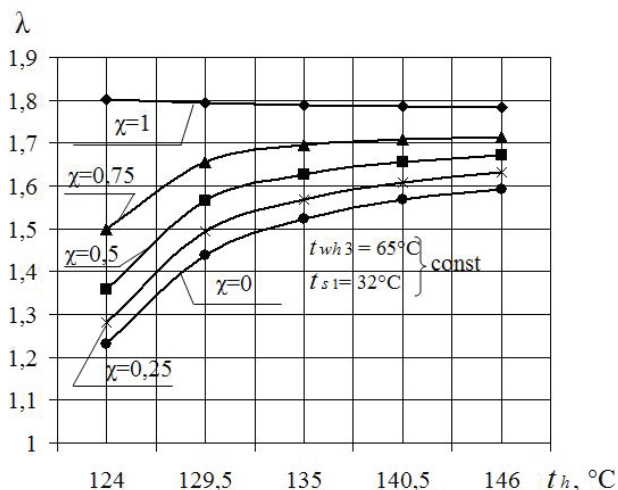


Рис. 3. Зависимость коэффициента трансформации от температуры греющего источника при различной степени регенерации теплоты в цикле

РТО, увеличивается разность температур между средами, участвующими в теплообмене и, как следствие, увеличиваются внешние необратимые потери. При анализе действительных циклов, в которых имеется недорекуперация на холодной стороне регенеративного теплообменника, появляются другие факторы, влияющие на коэффициент трансформации λ и роль недорекуперации теплоты на теплой стороне РТО нивелируется. При снижении кратности циркуляции уменьшается количество раствора, поступающего в генератор для выпаривания заданного количества рабочего вещества. Тепловая нагрузка генератора, таким образом, уменьшается, что приводит к увеличению коэффициента трансформации λ .

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что при повышении температуры греющего источника t_h все кривые зависимости $\lambda = \lambda(t_h)$ для действительных циклов асимптотически приближаются к теоретической зависимости. Это означает, что роль регенеративного теплообменника для внутренней регенерации теплоты в цикле при высоких значениях температуры греющего источника исчерпана и необходимо вводить в схему дополнительные регенеративные теплообменники.

Литература

1. Дзино А. А., Малинина О. С. Системы прямых и обратных термодинамических циклов для получения тепла и холода. VII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Ч. I: Материалы конференции. — СПб.: Университет ИТМО, 2015. С. 141–144.
2. Тимофеевский Л. С., Пекарев В. И., Бухарин Н. Н. и др. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин, тепловых насосов и термотрансформаторов. Ч. 1. Расчет циклов, термодинамических и теплофизических свойств рабочих веществ: Учеб. пособие / Под ред. Л. С. Тимофеевского. — СПб.: СПбГУНиПТ 2006. 260 с.

3. Бараненко А. В., Бухарин Н. Н., Пекарев В. И., Тимофеевский Л. С. Холодильные машины: Учебник для студентов вузов специальности «Техника и физика низких температур» / Под общей ред. Л. С. Тимофеевского. — СПб.: Политехника, 2006. 944 с.
4. Бараненко А. В., Тимофеевский Л. С., Долотов А. Г., Попов А. В. Абсорбционные преобразователи теплоты. Монография. — СПб.: СПбГУНИПТ, 2005. 338 с.
5. Богданов С. Н., Бурцев С. И., Иванов О. П., Куприянова А. В. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справочник. — СПб.: СПбГАХиПТ, 1999, 208 с.
6. Вукалович М. П., Ривкин С. Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара. — М.: Энергия, 1979. 80 с.
7. Ривкин С. А., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. — М.: Энергия, 1980. 424 с.
8. Караван С. В., Дзино А. А., Малышев А. А., Караван Д. В. Энтальпийная диаграмма водного раствора бромида лития // Вестник Международной академии холода. 2012. № 3. С. 36–38.
9. Löwer H. Thermodynamische Eigenschaften und Wärme – Diagramm der binären Systems Lithiumbromid-Wasser. // Kältetechnik. 1961. No 5.
10. Термодинамические свойства водных растворов бромистого лития / О. И. Верба, В. А. Груздев Л. Г. Захаренко и др. / В кн.: Теплофизические свойства растворов. — Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1983. С. 19–34.
11. Chua, H. T., Toh, H. K., Malek, A., Ng, K. C., Srinivasan, K. Improved thermodynamic property fields of LiBr-H₂O solution // International Journal of Refrigeration, 2000. Vol. 23, No. 6, pp. 412–429.
12. Alefeld G. Bestimmung der thermodynamischen Daten des Stoffpaares Wasser-Lithiumbromid. Technischen Universität. — München, 1991, 25 p.
2. Timofeeskii L. S., Pekarev V. I., Bukharin N. N. i dr. Thermal and constructive calculations of cooling machineries, thermal pumps and thermotransformers. P.I. Calculation of cycles, thermodynamic and heatphysical properties of working substances: The education guidance / Under edition L. S. Timofeevskogo. St.-Petersburg, 2006. 260 p. (in Russian)
3. Baranenko A. V., Bukharin N. N., Pekarev V. I., Timofeeskii L. S. Refrigerators: The textbook for students of technical colleges of specialty «Equipment and Physics of Low Temperatures». / Under edition L. S. Timofeevskogo. St.-Petersburg, 2006. 944 p. (in Russian)
4. Baranenko A. V., Timofeevskii L. S., Dolotov A. G., Popov A. V. Absorbing converters of warmth. Monograph. St.-Petersburg, 2005. 338 p. (in Russian)
5. Bogdanov S. N., Burtsev S. I., Ivanov O. P., Kupriyanova A. V. Refrigerating equipment. Air conditioning. Properties of substances: Reference book. St.-Petersburg, 1999, 208 p. (in Russian)
6. Vukalovich M. P., Rivkin S. L. Thermodynamic properties of water and water vapor. Moscow, 1979. 80 p. (in Russian)
7. Rivkin S. A., Aleksandrov A. A. Thermodynamic properties of water and water vapor. Moscow, 1980. 424 p. (in Russian)
8. Karavan S. V., Dzino A. A., Malyshev A. A., Karavan D. V. Entalpiy chart of water solution of bromide of lithium. Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda. 2012. No 3. p. 36–38. (in Russian)
9. Löwer H. Thermodynamische Eigenschaften und Wärme — Diagramm der binären Systems Lithiumbromid-Wasser. Kältetechnik. 1961. No 5.
10. Термодинамические свойства водных растворов бромид лития. / О. И. Верба, В. А. Груздев Л. Г. Захаренко и др. / В кн.: Теплофизические свойства растворов. — Новосибирск, 1983. С. 19–34. (in Russian)
11. Chua, H. T., Toh, H. K., Malek, A., Ng, K. C., Srinivasan, K. Improved thermodynamic property fields of LiBr-H₂O solution. International Journal of Refrigeration, 2000. Vol. 23, No. 6, pp. 412–429.
12. Alefeld G. Bestimmung der thermodynamischen Daten des Stoffpaares Wasser-Lithiumbromid. Technischen Universität. München, 1991, 25 p.

References

International
Institute of
Refrigeration



Faculty of Mechanical Engineering, Skopje
University "Ss. Cyril & Methodius"

INTERNATIONAL CONFERENCE Ammonia and CO₂

Refrigeration Technologies

May 11-13, 2017, Ohrid, Republic of Macedonia

IIR Commission B2 with B1 and D1

http://www.mf.edu.mk/web_ohrid2017/ohrid-2017.html

The topics of the conference are: design of modern ammonia and new CO₂ systems and technological innovations, improving energy efficiency, various applications, technical guidelines and safety regulations. It is very clear: by using more ammonia and CO₂ refrigerants, we are employing environmentally friendly technologies.