

УДК 621.574.013–932.2

Совершенствование системы охлаждения на базе АБХМ для повышения эффективности тригенерационного комплекса

А. Н. КОРНИЛЬЕВ*, канд. техн. наук О. С. МАЛИНИНА,
д-р техн. наук А. В. БАРАНЕНКО
Университет ИТМО
*E-mail: ankornilev@itmo.ru

Применение систем тригенерации обеспечивает экономию энергетических ресурсов и повышение энергоэффективности технологий. В действующих комплексах используют преимущественно серийные абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины (АБХМ). Авторами выполнен анализ энергетического баланса тригенерационного комплекса в составе с одноступенчатой двухсекционной АБХМ. Оценен эффект от использования в качестве источника тепла для привода АБХМ горячей воды из системы утилизации тепла, аккумулирующей тепло отходящих газов газопоршневых установок (ГПУ). Температура греющей воды генератора находится в диапазоне $t_h=(110...75)$ °С. С целью возможного увеличения холодопроизводительности системы охлаждения комплекса выполнен выбор и расчет комбинированного цикла АБХМ с двухступенчатой генерацией (тип 4), позволяющего одновременно утилизировать бросовую теплоту разного потенциала. Для данного термодинамического цикла АБХМ получены расчетные зависимости значений теплового коэффициента от зоны дегазации при разных температурах охлаждающей среды (тепловой коэффициент равен 0,93 при $t_{w1}=30$ °С, $\Delta\xi=4\%$), а также температурные графики горячей воды. Показано, что применение АБХМ с двухступенчатой генерацией (тип 4) дает возможность увеличить холодопроизводительность системы охлаждения на 10,6%. Это позволит более чем наполовину снизить нагрузку на пароконденсаторную холодильную машину (ПКХМ), тем самым снизить затраты на электрическую энергию, уменьшить количество пусков и остановов винтового компрессора. Результаты исследования могут быть использованы для модернизации систем охлаждения действующих тригенерационных комплексов.

Ключевые слова: тригенерация, абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина, растворный теплообменник, газопоршневая установка, система утилизации тепла, комбинированный термодинамический цикл.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 30.01.2025, одобрена после рецензирования 14.03.2025, принята к печати 27.03.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-3-10

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Корнильев А. Н., Малинина О. С., Бараненко А. В. Совершенствование системы охлаждения на базе АБХМ для повышения эффективности тригенерационного комплекса. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 3. С. 3-10. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-3-10

Improvement of the ABRC-based cooling system to increase the efficiency of the trigeneration complex

A. N. KORNILYEV*, Ph. D. O. S. MALININA, D. Sc. A. V. BARANENKO

ITMO University

*E-mail: ankornilev@itmo.ru

The use of trigeneration systems ensures energy resources saving and improvement of energy efficiency of technologies. Currently, serial absorption lithium bromide refrigerating chillers (ABRC) are generally used. The authors have analyzed the energy balance of a trigeneration complex with a single-stage two-section ABRC. The effect of using hot water from the heat utilization system accumulating the heat of waste gases from gas piston units (GPU) as a heat source for the ABRC drive is estimated. The temperature of the generator heating water is in the range of $t_h=(110...75)$ °С. To possibly increase the cooling capacity for the cooling system of the complex, the selection and calculation of the combined cycle of ABRC with two-stage generation (type 4), which allows simultaneous utilization of waste heat of different potential, is carried out. For this thermodynamic cycle of ABRC, the calculated dependences of values for the thermal coefficient from the degassing zone at different temperatures of cooling water (the thermal coefficient is equal to 0.93 at $t_{w1}=30$ °С, $\Delta\xi=4\%$), as well as temperature graphs of hot water have been obtained. It is shown that the application of ABRC with two-stage generation

(type 4) allows to increase the running capacity of the cooling system by 10.6%. It also allows to reduce the load on the steam compressor refrigeration machine (PCRM) by more than half, thereby reducing the cost of electrical energy and reducing the number of starts and stops of the screw compressor. The results of the research can be used for modernization of cooling systems in operating trigeneration complexes.

Keywords: trigeneration, absorption lithium bromide refrigerating chiller, solution heat exchanger, gas piston plant, heat utilization system, combined thermodynamic cycle.

Article info:

Received 30/01/2025, approved after reviewing 14/03/2025, accepted 27/03/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-3-10

Article in Russian

For citation:

Kornilyev A. N., Malinina O. S., Baranenko A. V. Improvement of the ABRC-based cooling system to increase the efficiency of the trigeneration complex. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 3. p. 3-10. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-3-10

Введение

Одним из направлений повышения энергоэффективности производств и экономики в целом является широкое распространение когенерации, тригенерации и полигенерации. Тригенерационные комплексы, как правило, вырабатывают электроэнергию, теплоту и холод. Последний энергоресурс производится преимущественно в абсорбционных бромистолитиевых холодильных машинах (АБХМ) за счет теплоты вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), образующихся при электрогенерации в газопоршневых или газотурбинных установках (ГПУ и ГТУ). В действующих тригенерационных циклах со множеством элементов и потребителей вопрос повышения их эффективности сводится, как правило, к получению оптимального энергетического баланса между генерирующим оборудованием. Множество научных исследований и обзоров мирового опыта применения систем тригенерации и когенерации посвящены именно этой проблематике. Рассматривая тот или иной тригенерационный комплекс, авторы делают выводы о прямой зависимости между объемом используемой бросовой тепловой энергии и достигаемым экономическим эффектом.

В модели использования АБХМ в Колумбии [1] просчитывается возможность сокращения выбросов отработанных газов на 59% при изменении энергоданса системы.

Анализ цикла АБХМ в тригенерационном комплексе на основе природного газа и биогаза [2] в Китае показывает возможность роста эффективности цикла на 9,5% при изменении объемного соотношения топливной смеси. Аналогичные выводы делают и авторы в публикации [3], добиваясь увеличения эффективности тригенерационного цикла на 12,9% путем улучшения рекуперации бросовой теплоты.

В публикациях [4, 5] приводится статистика энергопотребления тригенерационных систем в Барселоне и Берлине, отмечается достигнутая экономия первичных энергоресурсов до 25,35% и сокращение выбросов CO₂ до 241 138 кг/год.

В нескольких статьях [6]–[10] приводится экономическое обоснование увеличения эффективности работы когенерационных комплексов в большой энергетике путем использования АБХМ или абсорбционного теплово-

го насоса (АБТН). Наиболее популярными регионами являются Южная и Восточная Азия, где распространены схемы централизованного районного холодоснабжения.

В публикации [11] приводится описание двух различных циклов АБХМ, работающих в режиме теплового насоса (АБТН). В первом случае на электростанции в городе Соннам, Южная Корея, АБТН используется для охлаждения конденсатора паровой турбины, снижая нагрузку на испарительные градирни и используя теплоту воды на графике 46,4/40 °С. Для обогрева генератора АБТН используется пар 0,36 МПа, поступающий от турбины. Вода для централизованной системы отопления прогревается от 55 °С до 89 °С в абсорбере и генераторе теплового насоса. Перепад температуры на конденсаторе составляет 34 °С. Тепловой коэффициент COP $\zeta=1,7$, что в денежном эквиваленте выражается в увеличении ежегодной прибыли на 5,9 млн.\$.

Во втором случае описан цикл АБТН, работающего в промзоне Панволь, Сеул, Южная Корея. Конденсатор АБТН, как и в первом случае, вырабатывает горячую воду для системы централизованного отопления на графике 47/83 °С. Однако низкотемпературным источником тепла является не генерирующее энергетическое оборудование, а бросовая теплота от технологического процесса производства красок (34,5/27 °С). Четыре АБТН суммарной тепловой мощностью 54,8 МВт вырабатывают тепло с COP $\zeta=1,7$. Сокращение выбросов диоксида углерода CO₂ при переходе на цикл с тепловым насосом составило 13,4 т/год. Экономия природного газа — 5983000 м³/год.

Эффективная одновременная утилизация разнотенциальной бросовой теплоты в АБТН описана в публикации [12]. На ТЭЦ в Копенгагене, Дания, используются ГПУ для производства тепловой и электрической энергий. Выхлопные газы с температурой 460 °С напрямую прогревают высокотемпературный генератор АБТН, а теплота с рубашки охлаждения отводится через промежуточный теплообменник в испарителе АБТН (30/21 °С). Вода для системы отопления прогревается с 40 °С до 80 °С. Тепловая мощность АБТН составляет 1,81 МВт, а коэффициент COP $\zeta=1,74$.

В публикации [13] приводится методика оптимизации сложной энергосберегающей системы, в составе которой есть АБХМ с двумя растворными теплообменни-

ками. Из-за имеющего энергетического дисбаланса среднее значение холодопроизводительности АБХМ на 24% меньше номинального значения. С помощью математического метода имитационного моделирования находят оптимальные значения для каждого из элементов, что позволяет повысить холодопроизводительность до оптимального значения.

Выполненный анализ свидетельствует об актуальности и большом интересе исследователей и потребителей к использованию когенерационных и тригенерационных комплексов и повышению их эффективности.

Целью данной работы является совершенствование системы охлаждения на базе АБХМ для повышения эффективности существующего тригенерационного комплекса на основе системного анализа его параметров. Это позволит более чем наполовину снизить нагрузку на парокompрессионную холодильную машину (ПКХМ), тем самым снизить затраты на электрическую энергию, уменьшить количество пусков и остановок винтового компрессора на объекте исследования. В работе приводятся термодинамические параметры цикла АБХМ с двухступенчатой генерацией (тип 4), расчет которого в условиях объекта исследования ранее не публиковался.

Тригенерационный комплекс

Тригенерационные системы, в составе которых система утилизации тепла отходящих газов используется только для привода АБХМ, являются частным и в тоже время частым случаем. Применение АБХМ помимо увеличения эффективности обеспечивает снижение негативного влияния комплексов на окружающую среду

[14]–[17]. АБХМ с увеличенными или двояными расщорными теплообменниками отличаются возможностью стабильной работы без потери эффективности в системах утилизации тепла с низким расходом или с невысоким температурным потенциалом греющего источника.

Основными показателями эффективности АБХМ являются тепловой коэффициент и кратность циркуляции раствора, которая напрямую влияет на мощность расщорного насоса.

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

где Q_0 — холодопроизводительность, кВт; Q_h — тепловой поток.

Объект исследования находится в Ростовской обл., параметры: электрическая мощность $N_e=2470$ кВт; тепловая мощность $Q_m=3384$ кВт; холодопроизводительность АБХМ $Q_0=1642$ кВт; тип АБХМ — одноступенчатая водная с двумя секциями основных теплообменных аппаратов (график горячей воды $t_{h1}/t_{h2}=110/75$ °С, $53,7$ м³/ч; график охлажденной воды $t_{c1}/t_{c2}=6/11$ °С, 282 м³/ч); тип градирни — испарительная (график охлаждающей воды $t_{w1}/t_{w2}=31/37$ °С, 658 м³/ч). Параллельно с АБХМ в сеть подключена парокompрессионная холодильная машина (ПКХМ) холодопроизводительностью $Q_0=1580$ кВт, треть мощности которой используется для снятия пиковых нагрузок, а запас по мощности сделан для полного резервирования АБХМ. Холодильный центр эксплуатируется круглый год при постоянной нагрузке. Принципиальная схема системы тригенерации представлена на рис. 1, а температурные графики теплоносителей детализированы на рис. 2.

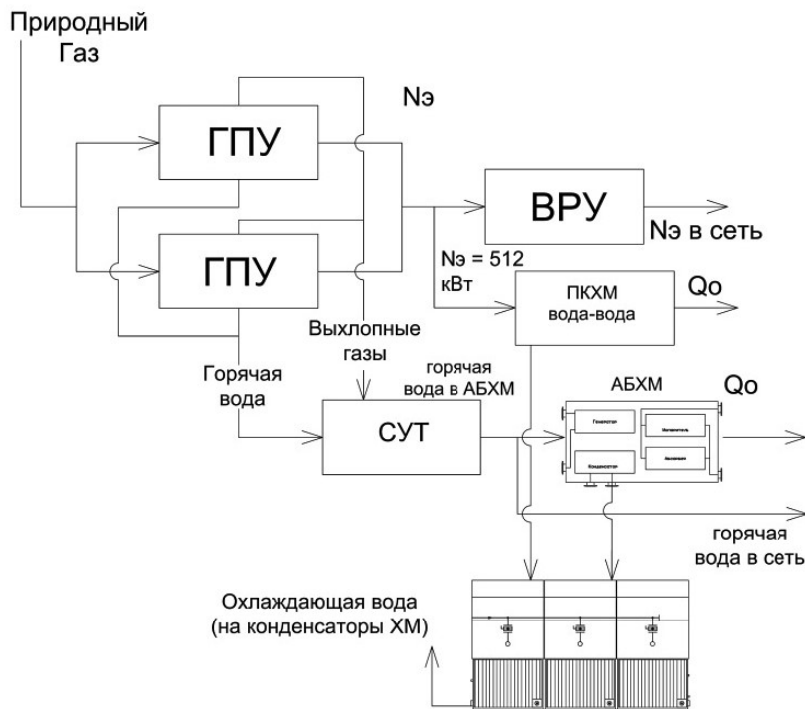


Рис. 1. Принципиальная схема системы тригенерации, где СУТ — система утилизации тепла, ПКХМ — парокompрессионная холодильная машина, ВРУ — вводно-расщорительное устройство

Fig. 1. Trigeneration system: СУТ — heat utilization system; ПКХМ — steam-compression refrigeration machine; ВРУ — input-distribution unit

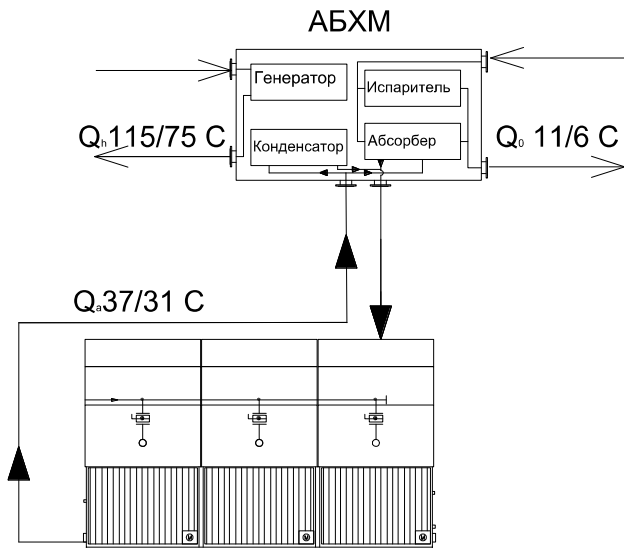


Рис. 2. Температурные графики теплоносителя в АБХМ

Fig. 2. Temperature graphs of coolant in ABRC

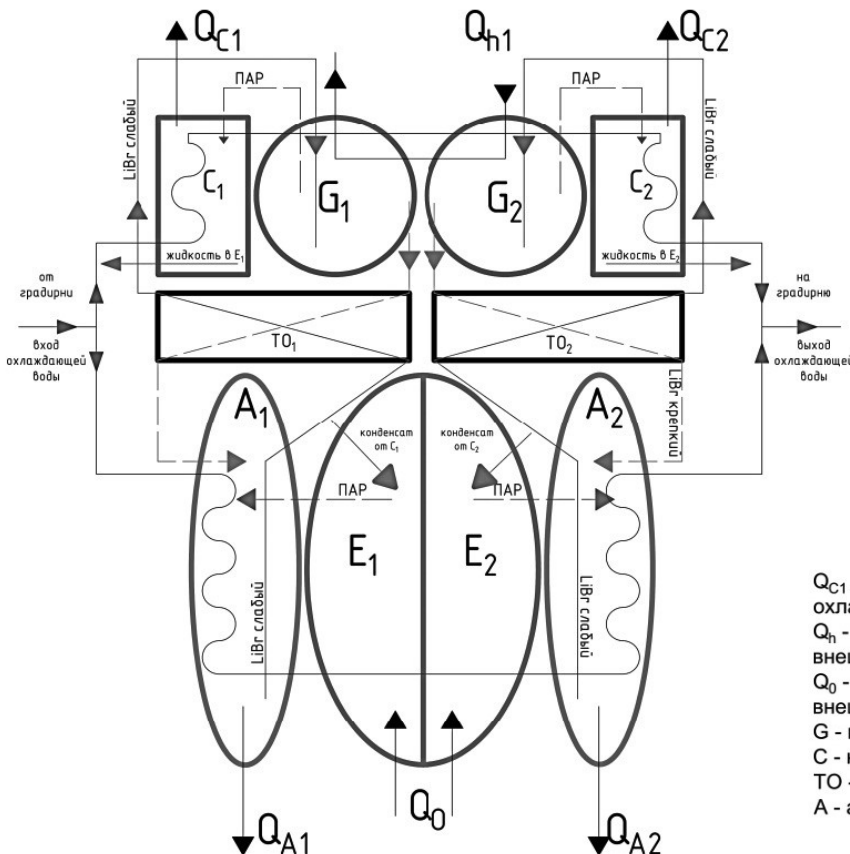
На рис. 3 показана принципиальная схема одноступенчатой двухсекционной АБХМ, используемой в тригенерационном комплексе. По существу АБХМ представляет из себя две одноступенчатые машины, подключенные последовательно. Такая компоновка позволяет увеличить в два раза отвод теплоты от греющей воды ($t_{h1}/t_{h2} = 110/75\text{ }^{\circ}\text{C}$) в сравнении с традиционной односту-

пенчатой АБХМ. Это обеспечивает увеличение холодопроизводительности машины также практически в два раза при одинаковом расходе греющего источника.

Две газопоршневые установки (ГПУ) модели MWM TCG-2020 V12, работающие на природном газе, подключены параллельно в сеть. Отходящие от ГПУ газы с температурой до $475\text{ }^{\circ}\text{C}$ поступают в систему утилизации тепла (СУТ), горячая вода с которой в основном используется для обогрева генератора АБХМ. Максимальный расход выхлопных газов одной ГПУ = 6484 кг/ч . Помимо тепловой мощности выхлопных газов полезным образом используется и горячая вода с рубашки охлаждения двигателя (температурный график $82/95\text{ }^{\circ}\text{C}$, максимальный расход $56\text{ м}^3/\text{ч}$). Утилизация теплоты в генераторе АБХМ с постоянной нагрузкой обеспечивает стабильную работу ГПУ.

На случай простоя холодильных машин для бесперебойной работы энергоцентра предусмотрены аварийные драйкулеры, которые байпасируют горячую воду с рубашки охлаждения ГПУ. В табл. 1 представлена характеристика двигателя ГПУ с основными рабочими параметрами.

Теплопроизводительность ГПУ может отличаться от номинальных значений в случае снижения нагрузки на электрическую сеть, поэтому для стабильного прогрева генератора АБХМ на случай резерва в схеме присутствует газовый котел, который при необходимости догревает горячую воду до заданной проектом температуры. Аналогичное решение предусмотрено и в тригенераци-



- $Q_{C1}, Q_{A1}, Q_{C2}, Q_{A2}$ - отвод теплоты на градирню охлаждающей жидкостью ($31/37\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Q_{h1} - подвод теплоты от внешнего источника, горячая вода ($110/75\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Q_o - подвод охлаждаемой жидкости от внешнего источника ($6/11\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- G - генераторы
- C - конденсаторы
- ТО - растворные теплообменники
- A - абсорберы

Рис. 3. Принципиальная схема одноступенчатой двухсекционной АБХМ

Fig. 3. Schematic diagram of a single-stage two-section ABRC

Таблица 1

Характеристика ГПУ MWM TCG-2020 V12 с основными рабочими параметрами

Table 1

Main operating parameters of gas piston plant MWM TCG-2020 V12

Мощность полезная	Расход природного газа	Температура масла	Характеристика охлаждающей жидкости			Характеристика отходящих газов	
			Давление, бар	$T_{вх}, ^\circ\text{C}$	$T_{вых}, ^\circ\text{C}$	Давление в ресивере, мбар	Температура отходящих газов, max $^\circ\text{C}$
1235	0,018	94	4,1	82	95	2375	475

онном комплексе в Ленинградской области, описанном авторами ранее [18]. Технологическая линия загружена круглогодично, все оборудование в энергоцентре эксплуатируется круглосуточно: летом вся тепловая энергия утилизируется в АБХМ; холодильная мощность потребляется термопластавтоматами; электрическая энергия также потребляется технологической линией; остатки электрической мощности уходят на бытовые нужды завода, а горячая вода более низкого потенциала после АБХМ уходит на ГВС. В холодный период года снижается тепловая нагрузка от технологической линии, поэтому АБХМ работают с остановками, а тепловая мощность используется для отопления и горячей водоснабжения.

В АБХМ используется перегретая вода, температурный потенциал которой позволил бы питать высокотемпературную ступень холодильной машины, но в данном случае для уменьшения расходов на циркуляционные насосы и теплообменное оборудование был сделан упор на снижение расхода греющего источника. Средняя температура раствора бромидов лития в генераторе не превышает $92,5\text{ }^\circ\text{C}$. Расчет теплового коэффициента показывает, что цикл по эффективности практически не отличается от классической одноступенчатой АБХМ с одним испарителем и абсорбером:

$$\zeta = \frac{Q_0}{Q_h} = \frac{G(t_{s1} - t_{s2})C \cdot \rho}{G(t_{h1} - t_{h2})C \cdot \rho} = \frac{1638,42}{2183,98} = 0,766,$$

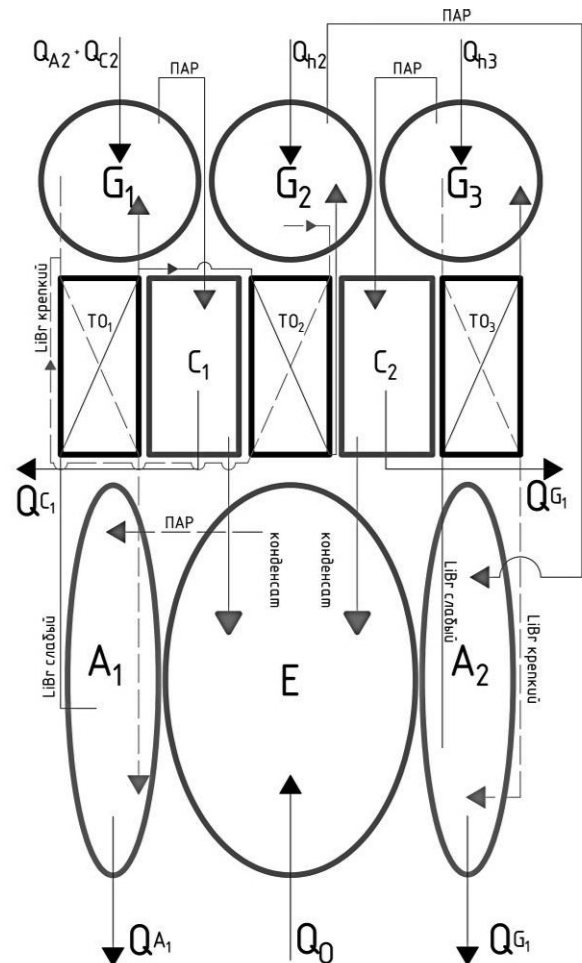
где G — массовый расход теплоносителя, кг/с; C — удельная теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К); ρ — плотность жидкости, кг/м³.

Системный анализ энергетических показателей рассматриваемого тригенерационного комплекса показал, что применение в системе охлаждения АБХМ, работающих по более эффективному термодинамическому циклу, обеспечит увеличение холодопроизводительности. Это

позволит повысить выпуск готовой продукции и приведет к снижению ее себестоимости, за счет уменьшения удельных расходов.

Термодинамический цикл АБХМ с двухступенчатой генерацией (тип 4).

Рассмотрим возможность использования в АБХМ комбинированного цикла (тип 4) с двухступенчатой генерацией, обладающего более высокой эффективностью в сравнении с одноступенчатым циклом. На рис. 4 представлена принципиальная схема цикла. Данный цикл был выбран для анализа также в связи с тем, что он позволяет утилизировать выхлопные газы напрямую в генераторе АБХМ, тем самым исключаются потери энергии



- Q_{C1}, Q_{A1} - отведение теплоты на градирню охлаждающей жидкостью (20...38 C)
- Q_h - подведение теплоты от внешнего источника (110...145C)
- Q_0 - подведение охлаждаемой жидкости от внешнего источника (5...15C)
- $Q_{A2} + Q_{C2}$ - подведение теплоты A_2 и C_2 к G_1
- $G_{1...3}$ - генераторы
- $C_{1...2}$ - конденсаторы
- $TO_{1...3}$ - экономайзеры
- $A_{1...2}$ - абсорберы

Рис. 4. Схема АБХМ с двухступенчатой генерацией (тип 4)

Fig. 4. ABRC with two-stage generation (type 4)

в промежуточных теплообменниках, и дает возможность раздельно использовать высоко- и среднетемпературные источники тепла.

В данном цикле по два абсорбера и конденсатора и три генератора, два промежуточных давления ($G_1 - C_1$ и $G_2 - A_2$), два контура циркуляции раствора $A_1 - G_1 - G_2 - A_1$ и $A_2 - G_3$. Пар из G_1 конденсируется в C_1 при первом промежуточном давлении, из G_2 абсорбируется в A_2 при втором промежуточном давлении, из G_3 конденсируется в C_2 . Теплота C_2 и A_2 используется для обогрева G_1 , G_2 и G_3 обогреваются внешним источником. Теплота от A_1 и C_1 отводится окружающей средой.

Расчеты выполнялись как при параметрах на объекте исследования, так и при прочих: температура охлаждающей среды варьировалась в пределах $t_{w1} = t_{w11} = t_{wk11}$ (20, 25, 30, 35°C), зона дегазации первой и второй ступеней составила $\Delta\xi = \Delta\xi_1 = \Delta\xi_2 = (3 \div 5) \%$, необратимые потери действительного цикла были приняты согласно рекомендациям, изложенным в известной литературе [19].

На рис. 5 представлены графики зависимостей теплового коэффициента действительного термодинамического цикла АБХМ с двухступенчатой генерацией (тип 4) от зоны дегазации.

Из графика на рис. 5 видно, что при принятых условиях осуществления циклов величина теплового коэффициента, в зависимости от $\Delta\xi$, находится в пределах 0,85÷1,06. С увеличением зоны дегазации от 3 до 5% величина ζ возрастает на 20,2%. Температура греющего источника, подаваемого в генератор G_1 АБХМ, должна составлять $t_h = 96 \div 145$ °С.

Результаты расчетов термодинамического цикла приведены в табл. 2:

Обсуждение результатов

В табл. 2 приведены основные параметры исследуемого цикла АБХМ с двухступенчатой генерацией (тип 4). Эффект от применения комбинированного цикла на объекте исследования состоит в повышении

Таблица 2

Параметры термодинамического цикла АБХМ с двухступенчатой генерацией (тип 4)

Table 2
Parameters of thermodynamic cycle of ABRC with two-stage generation (type 4)

	Зона дегазации $\Delta\xi$, %	Температура охлаждающей воды, °С			
		35	30	25	20
Средняя температура раствора LiBr в генераторе G_1 , °С	3	119,0	118,0	117,0	116,0
	4	—	118,0	117,0	116,0
	5	—	116,0	116,0	116,0
Действительная концентрация крепкого раствора LiBr, %	3	63,9	60,6	57,3	54,9
	4	—	61,6	58,2	55,8
	5	—	62,2	59,8	56,6
Кратность циркуляции раствора, a_1	3	17,0	16,5	15,4	14,7
	4	—	12,2	11,6	11,2
	5	—	10,9	9,6	8,9
Тепловой коэффициент ζ	3	0,85	0,88	0,92	0,96
	4	—	0,93	0,98	1,03
	5	—	0,97	1,03	1,06

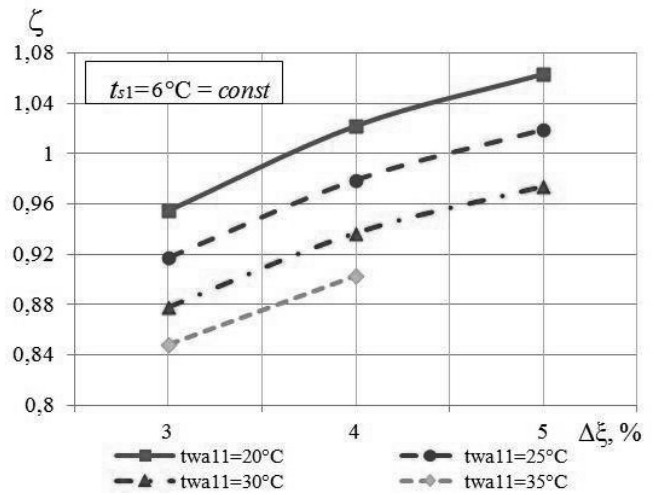


Рис. 5. График зависимостей теплового коэффициента от зоны дегазации при различных параметрах охлаждающей жидкости

Fig. 5. Dependences of thermal coefficient on degassing zone at different coolant parameters

теплового коэффициента с 0,77 до 0,93 ($t_{w1} = 30$ °С, $\Delta\xi = 4$ %), что повысит холодопроизводительность АБХМ на 341,19 кВт (+17%), а общую холодопроизводительность центра с учетом ПКХМ на $((1642,0+1580,0/3+341,2)-(1642,0+1580,0/3))/(1642,0+1580,0/3+341,2) = 13,6\%$. Прирост холодильной мощности АБХМ позволит более чем наполовину снизить нагрузку на ПКХМ, тем самым: снизить затраты на электрическую энергию, уменьшить количество пусков и остановов винтового компрессора.

Следует отметить, что существует возможность увеличения потенциала использования теплоты выхлопных газов. На сегодняшний день газы отводятся в атмосферу после СУТ с температурой 180...200 °С, понижение температуры до 140 °С позволит дополнительно увеличить бросовой тепловой поток на $Q_T = V(T_1 - T_2) C_p \rho / 3600 = 108,6$ кВт, что увеличит производительность АБХМ еще на 101,0 кВт, а также снизит объем выбросов диоксида углерода CO_2 на 7,4%.

В тех регионах, где температура мокрого термометра позволяет круглогодично поддерживать температуру охлаждающей воды $t_{w1} = 25$ °С, эффект от перехода на комбинированный цикл тип 4 вместо одноступенчатого даст прирост холодопроизводительности в 23%.

Заключение

На энергобаланс тригенерационного цикла влияет изменение эффективности каждого из элементов системы. Полученные результаты по увеличению холодопроизводительности АБХМ почти на четверть имеют значимый экономический эффект, однако описывают только один из векторов развития и могут не раскрывать полный потенциал по увеличению тригенерационного цикла. Увеличение глубины утилизации выхлопных газов — это один из путей по увеличению эффекта. В дальнейшем исследовании стоит рассмотреть изменение эффективности с учетом возможной модернизации генерирующего оборудования.

Литература

1. *Andrés Rodríguez-Toscano, Carlos Amaris, Alexis Sagastume-Gutiérrez, Mahmoud Bourouis*. Technical, environmental, and economic evaluation of a solar/gas driven absorption chiller for shopping malls in the Caribbean region of Colombia. // *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, Vol. 30, 101743. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101743>.
2. *Wang J., Mao T., Sui J., Jin H.* Modeling and performance analysis of CCHP (combined cooling, heating and power) system based on co-firing of natural gas and biomass gasification gas. // *Energy*. 2015. Vol. 93, p. 801–815, DOI: 10.1016/j.energy.2015.09.091
3. *Mujahid Naseem, Sanghyoun Park, Sangyong Lee*. Experimental and theoretical analysis of a trigeneration system consisting of adsorption chiller and high temperature PEMFC. // *Energy Conversion and Management*. 2022. vol. 251. P. 114977. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114977>
4. *Dereje S. Ayou, Muhammad Fa'iq Vidi Wardhana, Alberto Coronas*. Performance analysis of a reversible water/LiBr absorption heat pump connected to district heating network in warm and cold climates. // *Energy*, 2023, Vol. 268. P. 126679. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126679>.
5. *Pavel Atanasoae, Radu Dumitru Pentiu, Laurentiu Dan Milici*. Opportunity Analysis of Cogeneration and Trigereneration Solutions: An Application in the Case of a Drug Factory. // *Energies*. 2022, vol. 15, p. 2737. <https://doi.org/10.3390/en15082737>.
6. *Батенин В. М., Маслеников В. М., Выскубенко Ю. А., Цалко Э. А., Штеренберг В. Я.* Парогазовая энергетическая установка для комбинированной выработки электрической энергии, теплоты и холода (тригенерация). // *Теплофизика высоких температур*. 2014. том 52. № 6. с. 934–940. DOI: 10.7868/S0040364414060039.
7. *Галимова Л. В., Славин Р. В.* Анализ эффективности энергосберегающей системы тригенерации. // *Холодильная техника*. 2012. № 3. <https://doi.org/10.17816/RF98195>.
8. *Rajendran Nadhini, Baskaran Sivaprakash, Natarajan Rajamohan*. Waste heat recovery at low temperature from heat pumps, power cycles and integrated systems — Review on system performance and environmental perspectives. // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 52, part B. p. 102214. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102214>
9. *Jinshi Wang, Weiqi Liu, Guangyao Liu, Weijia Sun, Gen Li and Binbin Qiu*. Theoretical Design and Analysis of the Waste Heat Recovery System of Turbine Exhaust Steam Using an Absorption Heat Pump for Heating Supply. // *Energies*. 2022. Vol. 13, p. 6256. DOI: 10.3390/en13236256.
10. *Radchenko A., Radchenko M., Konovalov A., Zubarev A.* Increasing electrical power output and fuel efficiency of gas engines in integrated energy system by absorption chiller scavenge air cooling on the base of monitoring data treatment. // *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 70. P. 03011. DOI: 10.1051/e3sconf/20187003011.
11. *Haye Min, Huyung Won Choi, Jaehui Jeong, Jinhee Jeong, Young Kim, Yong Tae Kang*. Daily sorption thermal battery cycle for building applications. // *Energy*. 2023. Vol. 282. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129016.
12. *Jaehui Jeong, Han Sol Jung, Jae Won Lee, Yong Tae Kang*. Hybrid cooling and heating absorption heat pump cycle with thermal energy storage. // *Energy*. 2023. Vol. 283. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129027>.

References

1. *Andrés Rodríguez-Toscano, Carlos Amaris, Alexis Sagastume-Gutiérrez, Mahmoud Bourouis*. Technical, environmental, and economic evaluation of a solar/gas driven absorption chiller for shopping malls in the Caribbean region of Colombia. // *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, Vol. 30, 101743. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101743>.
2. *Wang J., Mao T., Sui J., Jin H.* Modeling and performance analysis of CCHP (combined cooling, heating and power) system based on co-firing of natural gas and biomass gasification gas. // *Energy*. 2015. Vol. 93, p. 801–815, DOI: 10.1016/j.energy.2015.09.091
3. *Mujahid Naseem, Sanghyoun Park, Sangyong Lee*. Experimental and theoretical analysis of a trigeneration system consisting of adsorption chiller and high temperature PEMFC. // *Energy Conversion and Management*. 2022. vol. 251. P. 114977. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114977>
4. *Dereje S. Ayou, Muhammad Fa'iq Vidi Wardhana, Alberto Coronas*. Performance analysis of a reversible water/LiBr absorption heat pump connected to district heating network in warm and cold climates. // *Energy*, 2023, Vol. 268. P. 126679. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126679>.
5. *Pavel Atanasoae, Radu Dumitru Pentiu, Laurentiu Dan Milici*. Opportunity Analysis of Cogeneration and Trigereneration Solutions: An Application in the Case of a Drug Factory. // *Energies*. 2022, vol. 15, p. 2737. <https://doi.org/10.3390/en15082737>.
6. *Batenin V. M., Maslennikov V. M., Vyskubenko Yu. A., Tsalko E. A., Shterenberg V. Ya.* Combined-cycle power plant for combined generation of electric energy, heat and cold (trigereneration). // *High temperature thermophysics*. 2014. Vol. 52. No. 6. pp. 934–940. (in Russian)
7. *Galimova L. V., Slavin R. B.* Efficiency analysis of an energy-saving trigeneration system. // *Refrigeration technology*. 2012. no 3. (in Russian)
8. *Rajendran Nadhini, Baskaran Sivaprakash, Natarajan Rajamohan*. Waste heat recovery at low temperature from heat pumps, power cycles and integrated systems — Review on system performance and environmental perspectives. // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 52, part B. p. 102214. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102214>
9. *Jinshi Wang, Weiqi Liu, Guangyao Liu, Weijia Sun, Gen Li and Binbin Qiu*. Theoretical Design and Analysis of the Waste Heat Recovery System of Turbine Exhaust Steam Using an Absorption Heat Pump for Heating Supply. // *Energies*. 2022. Vol. 13, p. 6256. DOI: 10.3390/en13236256.
10. *Radchenko A., Radchenko M., Konovalov A., Zubarev A.* Increasing electrical power output and fuel efficiency of gas engines in integrated energy system by absorption chiller scavenge air cooling on the base of monitoring data treatment. // *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 70. P. 03011. DOI: 10.1051/e3sconf/20187003011.
11. *Haye Min, Huyung Won Choi, Jaehui Jeong, Jinhee Jeong, Young Kim, Yong Tae Kang*. Daily sorption thermal battery cycle for building applications. // *Energy*. 2023. Vol. 282. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129016.
12. *Jaehui Jeong, Han Sol Jung, Jae Won Lee, Yong Tae Kang*. Hybrid cooling and heating absorption heat pump cycle with thermal energy storage. // *Energy*. 2023. Vol. 283. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129027>.

13. Галимова Л. В., Байрамов Д. З. Методика оптимизации сложной энергосберегающей энергетической системы. // Холодильная техника. 2019. Т. 108. № 1. с. 30–37. <https://doi.org/10.17816/RF99490>
14. Zhang Hongsheng, Zhao Hongbin, Li Zhenlin, Hu Eric. Optimization Potentials for the Waste Heat Recovery of a Gas-Steam Combined Cycle Power Plant Based on Absorption Heat Pump. // Journal of Thermal Science. 2019. Vol. 28, No. 2. P. 283–293. <https://doi.org/10.1007/s11630-018-1055-7>
15. Зайцев А. В., Малинина О. С., Бараненко А. В. Влияние среднесуточной температуры и влажности воздуха на эффективность гелиохолодильных абсорбционных бромистолитиевых машин. // Омский научный вестник. 2018. Т. 2, № 2. с. 40–47. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2018-2-2-40-47>
16. Liu M., Cheng Y., Cheng W., Zhan C. Dynamic performance analysis of a solar driving absorption chiller integrated with absorption thermal energy storage. // Energy conversion and management, 2021, vol. 247, p. 114769. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114769>
17. Tran Thi Thu Ha. Comparison of the energy efficiency and environment effects of absorption chiller and vapor compression refrigeration // International cooperation issue of transportation. Especial Issue. 2021. No. 11, p. 177–184.
18. Корнильев А. Н., Бараненко А. В., Малинина О. С. Повышение эффективности применения абсорбционной холодильной машины для утилизации тепла когенерационных установок в схеме с использованием парокompрессионной машины в качестве резервного источника холода. // Проблемы региональной энергетики. 2024. № 1. (61) с. 75–86. DOI: 10.52254/1857-0070.2024.1-61.07
19. Xu Z. Y., Wang R. Z. Absorption refrigeration cycles: Categorized based on the construction. // International journal of refrigeration, 2016. Vol. 62, p 114–136. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.10.007>
13. Galimova L. V., Bayramov D. Z. Methodology for optimizing a complex energy-saving energy system. *Refrigeration equipment*. 2019. Vol. 108. No. 1. pp. 30–37. <https://doi.org/10.17816/RF99490>. (in Russian)
14. Zhang Hongsheng, Zhao Hongbin, Li Zhenlin, Hu Eric. Optimization Potentials for the Waste Heat Recovery of a Gas-Steam Combined Cycle Power Plant Based on Absorption Heat Pump. *Journal of Thermal Science*. 2019. Vol. 28, No. 2. P. 283–293. <https://doi.org/10.1007/s11630-018-1055-7>
15. Zaitsev A. V., Malinina O. S., Baranenko A. V. The effect of average daily temperature and humidity on the efficiency of solar-cooled absorption bromistolithium machines. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018. Vol. 2, No. 2. pp. 40–47. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2018-2-2-40-47>. (in Russian)
16. Liu M., Cheng Y., Cheng W., Zhan C. Dynamic performance analysis of a solar driving absorption chiller integrated with absorption thermal energy storage. *Energy conversion and management*, 2021, vol. 247, p. 114769. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114769>.
17. Tran Thi Thu Ha. Comparison of the energy efficiency and environment effects of absorption chiller and vapor compression refrigeration. *International cooperation issue of transportation. Especial Issue*. 2021. No. 11, p. 177–184.
18. Kornilyev A. N., Baranenko A. V., Malinina O. S. Improving the efficiency of using an absorption refrigerating machine for heat recovery of cogeneration plants in a scheme using a steam compression machine as a backup source of cold. *Problems of regional energy*. 2024. No. 1. (61) pp. 75–86. DOI: 10.52254/1857-0070.2024.1-61.07
19. Xu Z. Y., Wang R. Z. Absorption refrigeration cycles: Categorized based on the construction. *International journal of refrigeration*. 2016. Vol. 62, p 114–136. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.10.007>

Сведения об авторах

Корнильев Алексей Никитович

Аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, ankornilev@itmo.ru

Малинина Ольга Сергеевна

К. т. н., доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, osmalinina@itmo.ru

Бараненко Александр Владимирович

Д. т. н., профессор, Университет ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, avbaranenko@itmo.ru

Information about authors

Kornilyev Alexey N.

Graduate student of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, ankornilev@itmo.ru

Malinina Olga S.

Ph. D., Associate professor of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, osmalinina@itmo.ru

Baranenko Aleksandr V.

D. Sc., Professor, ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, avbaranenko@itmo.ru



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»