

УДК 621.311

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АБСОРБЦИОННОЙ БРОМИСТО-ЛИТИЕВОЙ
ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАБОТЫ ВОЗДУШНО-АККУМУЛИРУЮЩЕЙ ГАЗОТУРБИННОЙ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

Р.З. Аминов^{1,2}, С.В. Новичков²

¹Саратовский научный центр РАН

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

oepran@inbox.ru, novishkovsv@mail.ru

***Резюме:** Предложена схема воздушно-аккумуляторной газотурбинной электростанции (ВАГТЭ) с использованием, в период спада электрической нагрузки, абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины (АБХМ) для добавочного охлаждения сжатого воздуха в дополнительном охладителе перед воздушным аккумулятором. Проведен технико-экономический анализ возможных вариантов изменения в составе и длительности работы компрессорного и турбинного оборудования ВАГТЭ в связи с дополнительным снижением температуры сжатого воздуха при использовании АБХМ на 10 – 20 °С. Вариант внедрения АБХМ в схему ВАГТЭ, при котором профили компрессора и газовой турбины не меняются, а изменяется продолжительность их работы, оказывается более эффективным.*

***Ключевые слова:** воздушно-аккумуляторная газотурбинная электростанция, абсорбционная бромисто-литиевая холодильная машина, воздушный аккумулятор, дополнительная электрическая мощность, чистый дисконтированный доход.*

**USE OF THE ABSORPTION LITHIUM BROMIDE REFRIGERATING MACHINE
FOR INCREASE IN OVERALL PERFORMANCE OF COMPRESSED-AIR POWER
STATION**

R.Z. Aminov¹, S.V. Novichkov²

¹Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

²Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

oepran@inbox.ru, novishkovsv@mail.ru

***Abstract:** The scheme of compressed-air power plant with use, during recession of electric loading, the absorption lithium bromide refrigerating machine for additional cooling of compressed air in an aftercooler in front of the air accumulator is offered. The technical and economic analysis of possible variants of change in structure and duration of operation of the compressor and turbine equipment of compressed-air power plant in connection with additional decrease in temperature of compressed air when using absorption lithium bromide refrigerating machine by 10 – 20 °C is carried out. The variant of introduction of absorption lithium bromide refrigerating machine in the scheme of compressed-air power plant at which profiles of the compressor and gas turbine don't change and changes the duration of their work, it appears more effective.*

***Keywords:** compressed-air power station, absorption lithium bromide refrigerating machine, compressed air energy storage, electrical capacity, net present value.*

Введение

Одним из способов, позволяющих сглаживать неравномерность электропотребления, является производство электроэнергии на основе воздушно-аккумулирующих газотурбинных электростанций (ВАГТЭ). Цикл сжатия здесь протекает отдельно от циклов сжигания топлива и расширения. Энергия, получаемая во внепиковые периоды (ночное время), используется для предварительного сжатия воздуха, который хранится в подземной полости. Существует множество схем установок, в которых аккумулированная энергия в виде сжатого воздуха используется для выработки пиковой энергии [1].

Компрессорная группа ВАГТЭ приводится во вращение электрическим двигателем, потребляющим дешевую ночную электроэнергию. Воздух, предварительно охлажденный циркуляционной водой системы технического водоснабжения, закачивается в воздушный аккумулятор, где он хранится в сжатом виде.

Однако температура сжатого предварительно охлажденного воздуха, направляемого в воздушный аккумулятор, по-прежнему остается достаточно высокой, что приводит к снижению количества закачиваемого в воздушный аккумулятор воздуха и, соответственно, выработке пиковой электроэнергии воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанцией.

Теоретические основы

При закачке воздуха в хранилище постоянного давления ($P=\text{const}$) количество аккумулируемого воздуха определяется следующим образом:

$$G_{\text{ак}} = \frac{V_{\text{хр}}}{\nu}, \quad (1)$$

где $V_{\text{хр}}$ – объем хранилища в конце закачки воздуха, м^3 ; ν – удельный объем закачиваемого воздуха, $\text{м}^3/\text{кг}$.

В расчете на единицу объема хранения, с учетом (1):

$$g_{\text{ак}} = \frac{G_{\text{ак}}}{V_{\text{хр}}} = \frac{1}{\nu} = \rho, \quad (2)$$

где $g_{\text{ак}}$ – удельное количество аккумулируемого воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ – удельная плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Таким образом, удельный объем ν при закачке с постоянным давлением зависит от температуры воздуха; и чем глубже мы его охлаждаем, тем больше будет $G_{\text{ак}}$.

Использование абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины на этапе закачивания сжатого воздуха в воздушный аккумулятор могло бы повысить эффективность работы воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанции. В абсорбционных агрегатах на бромиде лития в качестве охладителя используется вода, а в качестве абсорбционного материала – водный раствор бромида лития. Этот раствор очень легко вступает в реакцию с водяным паром и, при его наличии, впитывает его до насыщения.

На рис. 1 показана схема воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанции с подключением к абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машине. В период спада электрической нагрузки воздух, сжатый компрессорной группой ВАГТЭ 1, 2, 3, предварительно охлажденный в промежуточных охладителях 4, 5, 6, добавочно охлаждают в дополнительно установленном охладителе сжатого воздуха 11, который подключают к испарителю АБХМ 14. Контур нагрева генератора АБХМ 21 подключают на входе и выходе к обратному трубопроводу циркуляционной воды 9. Горячая вода, поступающая в генератор 18, способствует процессу десорбции раствора с выделением водяного пара, который затем поступает в конденсатор АБХМ 19. Из конденсатора через дроссельное устройство

конденсат подается в испаритель 14, где за счет его частичного испарения совершается холодильное действие. Пары воды из испарителя поступают в абсорбер 16, где смешиваются с раствором бромистого лития, поступающего из генератора 18, и обогащенный водой раствор снова подается в генератор. Конденсатор АБХМ 19 и абсорбер АБХМ 16 охлаждаются водой из подающего трубопровода циркуляционной воды 8. Добавочно охлажденный, тем самым увеличенный, расход воздуха направляют в воздушный аккумулятор 12.

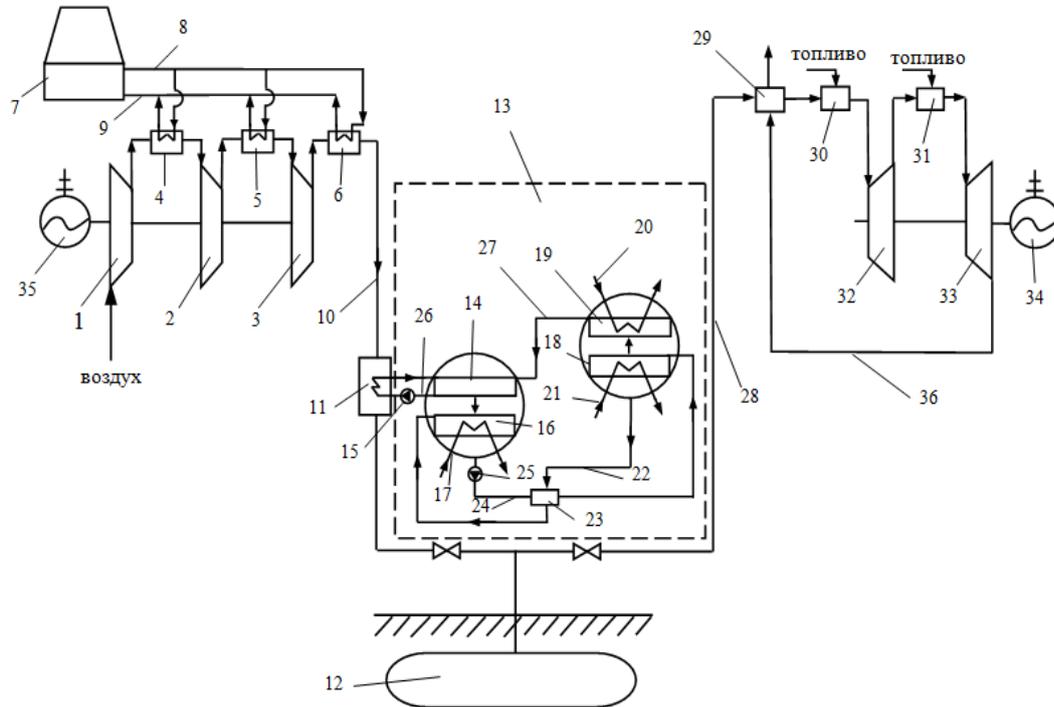


Рис. 1. Схема ВАГТЭ с АБХМ:

1 – компрессор низкого давления; 2 – компрессор среднего давления; 3 – компрессор высокого давления; 4, 5, 6 – промежуточные охладители воздуха; 7 – градирня; 8 – подающий трубопровод циркуляционной воды; 9 – обратный трубопровод циркуляционной воды; 10, 28 – трубопроводы сжатого воздуха; 11 – дополнительный охладитель сжатого воздуха; 12 – воздушный аккумулятор; 13 – абсорбционная бромисто-литиевая холодильная машина (АБХМ); 14 – испаритель АБХМ; 15 – насос охлажденной воды; 16 – абсорбер АБХМ; 17 – контур охлаждения абсорбера АБХМ; 18 – генератор АБХМ; 19 – конденсатор АБХМ; 20 – контур охлаждения конденсатора АБХМ; 21 – контур нагрева генератора АБХМ; 22 – трубопровод горячего слабого раствора; 23 – теплообменник; 24 – трубопровод холодного крепкого раствора; 25 – насос абсорбента; 26 – трубопровод охлажденной воды; 27 – трубопровод конденсата; 29 – регенератор; 30 – камера сгорания высокого давления; 31 – камера сгорания низкого давления; 32 – газовая турбина высокого давления; 33 – газовая турбина низкого давления; 34 – электрический генератор; 35 – электрический двигатель; 36 – газоход уходящих газов газовой турбины

В период суточного подъема электрической нагрузки сжатый воздух по трубопроводу 28 направляют к регенератору 29. В камерах сгорания высокого 30 и низкого 31 давлений воздух участвует в окислении топлива, и увеличенный объем продуктов сгорания подают в проточную часть газовых турбин высокого 32 и низкого 33 давлений.

В качестве критериев анализа схемы воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанции с АБХМ использовались: удельный расход аккумулируемого воздуха $g_{ак}$; электрическая мощность $N_{эл}$.

Количественную оценку выработки энергии на базе аккумулируемого воздуха можно определить на основе удельного отпуска энергии на единицу расхода аккумулированного воздуха e , (кВт·ч/кг):

$$e = \frac{\mathcal{E}_{\text{ГТ}} - \mathcal{E}_{\text{к}}}{G_{\text{ак}}}, \quad (3)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ГТ}}$ – часовой отпуск электроэнергии газовой турбиной в процессе разрядки ВАГТЭ, кВт·ч; $\mathcal{E}_{\text{к}}$ – потребление электроэнергии компрессором в процессе зарядки ВАГТЭ, кВт·ч; $G_{\text{ак}}$ – количество аккумулируемого воздуха за один суточный цикл, кг.

Увеличение количества аккумулируемого воздуха приведет к увеличению мощности компрессора и потребления электроэнергии на его привод, росту расхода топлива в камеры сгорания газовой турбины и потребует рассмотреть ряд изменений по составу и длительности работы компрессорного и турбинного оборудования ВАГТЭ. Можно представить следующие варианты изменений:

1) профили компрессора и газовой турбины остаются неизменными, но увеличивается время работы в режимах зарядки и разрядки;

2) профиль компрессора меняется, профиль газовой турбины не меняется, время работы в режиме зарядки сохраняется постоянным, в режиме разрядки – увеличивается;

3) профили компрессора и газовой турбины меняются, время работы в режимах зарядки и разрядки остаются без изменений.

Увеличение подачи аккумулируемого воздуха при неизменном профиле компрессора или газовой турбины потребует большего времени на работу ВАГТЭ в соответствующем режиме.

Экономическая целесообразность использования абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины в схеме ВАГТЭ определяется стоимостью дополнительной электрической мощности, получаемой в газовой турбине в период суточного подъема электрической нагрузки. В денежном выражении эффективность дополнительной выработки электроэнергии определяется с помощью прироста чистого дисконтированного дохода ($\Delta\text{ЧДД}$), который для представленных вариантов будет иметь следующий вид:

1) для варианта сохранения профилей компрессора и газовой турбины:

$$\Delta\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (\Delta R_t - \Delta Z_{m_t} - \Delta Z_{\mathcal{E}/\mathcal{E}t}) \cdot \alpha_t - \sum_{t=0}^T K_{\text{сумт}} \cdot \alpha_t; \quad (4)$$

2) для варианта изменения профиля компрессора и сохранения профиля газовой турбины:

$$\Delta\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (\Delta R_t - \Delta Z_{m_t} - \Delta Z_{\mathcal{E}/\mathcal{E}t}) \cdot \alpha_t - \sum_{t=0}^T (K_{\text{сумт}} + \Delta K_{\text{комт}}) \cdot \alpha_t; \quad (5)$$

3) для варианта изменения профилей компрессора и газовой турбины:

$$\Delta\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (\Delta R_t - \Delta Z_{\text{ГТ}} - \Delta Z_{\mathcal{E}/\mathcal{E}t}) \cdot \alpha_t - \sum_{t=0}^T (K_{\text{сумт}} + \Delta K_{\text{комт}} + \Delta K_{\text{ГТ}}) \cdot \alpha_t, \quad (6)$$

где T – горизонт расчета; t – шаг расчета; ΔR_t – прирост дохода от реализации электроэнергии, дополнительно вырабатываемой за счет использования АБХМ в схеме ВАГТЭ, на t шаге расчета, млн.руб. в год; $\Delta Z_{\text{ГТ}}$ – прирост затрат на дополнительное топливо, подаваемое в камеры сгорания газовой турбины на t -м шаге расчета, млн руб. в год; $\Delta Z_{\mathcal{E}/\mathcal{E}t}$ – прирост затрат электроэнергии на привод компрессора, на t -м шаге расчета, млн руб. в год; $K_{\text{сумт}}$ – суммарные капиталовложения в связи с установкой АБХМ на промышленной площадке ВАГТЭ на t -м шаге расчета, млн руб. в год; $\Delta K_{\text{комт}}$ – прирост капиталовложений при изменении профиля компрессора, млн руб. в год; $\Delta K_{\text{ГТ}}$ – прирост капиталовложений при изменении профиля газовой турбины, млн руб. в год; α_t – коэффициент дисконтирования на t -м шаге расчета.

Прирост дохода от реализации дополнительно вырабатываемой электроэнергии ВАГТЭ на t -м шаге расчета можно представить в следующем виде:

$$\Delta R_t = \mathcal{E}_{\text{выпр}t} \cdot (1 - \beta_{\text{сн}})_t \cdot T_{\text{пт}}, \quad (7)$$

где $\mathcal{E}_{\text{выпр}t}$ – количество дополнительно вырабатываемой электроэнергии на t -м шаге расчета, кВт·ч/год; $T_{\text{пт}}$ – тариф на отпускаемую пиковую электроэнергию, руб/ кВт·ч; $\beta_{\text{сн}}$ – доля электроэнергии, расходуемая на собственные нужды.

Количество дополнительно выработанной электроэнергии ВАГТЭ:

$$\mathcal{E}_{\text{выпр}t} = \sum_{i=1}^I \Delta N_{\text{сут}i} \cdot n_{\text{сут}} \cdot \tau_{\text{рт}}, \quad (8)$$

где $\Delta N_{\text{сут}i}$ – дополнительная электрическая мощность ВАГТЭ на t -м шаге расчета, кВт; $\tau_{\text{рт}}$ – время работы ВАГТЭ в режиме разрядки, ч/сут; $n_{\text{сут}}$ – количество рабочих суток ВАГТЭ в году, сут/год.

Прирост затрат электроэнергии на привод компрессора

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{эл}t} = \Delta N_{\text{ком}t} \cdot n_{\text{сут}} \cdot \tau_{\text{з}t} \cdot T_{\text{нт}}, \quad (9)$$

где $\Delta N_{\text{ком}t}$ – дополнительная мощность потребляемая компрессором на t -м шаге расчета, кВт; $\tau_{\text{з}t}$ – время работы ВАГТЭ в режиме зарядки, ч/сут; $T_{\text{нт}}$ – тариф за потребление ночной электроэнергии, руб/ кВт·ч;

Капиталовложения в связи с установкой АБХМ на промышленной площадке ВАГТЭ определяются следующим образом:

$$K_{\text{сум}t} = K_{\text{абхм}t} + K_{\text{доп.охл}t} + K_{\text{доп.град}t}, \quad (10)$$

где $K_{\text{абхм}t}$ – капиталовложения в оборудование АБХМ на t -м шаге расчета, млн.руб; $K_{\text{доп.охл}t}$ – капиталовложения в дополнительный охладитель сжатого воздуха на t -м шаге расчета, млн. руб; $K_{\text{доп.град}t}$ – капиталовложения в реконструкцию градирни, в связи с увеличением поверхности теплообмена для возросшего количества охлаждающей воды, направляемой в контуры охлаждения абсорбера и конденсатора АБХМ на t -м шаге расчета, млн. руб.

Результаты

Расчеты схемы ВАГТЭ с АБХМ проводились для следующих исходных условий. В состав ВАГТЭ входит воздушный аккумулятор постоянного давления, в который подается воздух с давлением 6,6 МПа. Давление воздуха перед камерой сгорания высокого давления составляет 5,5 МПа; температура воздуха после регенератора – 250°C; температура продуктов сгорания перед газовой турбиной принята 1300 °С. Температура сжатого воздуха перед дополнительным охладителем – 40 °С. Электрическая мощность компрессора в режиме зарядки составила 82,63 МВт, электрическая мощность газовой турбины в режиме разрядки – 202,28 МВт. Время работы ВАГТЭ в режиме зарядки и разрядки принято одинаковым – 4 ч/сут. Удельный отпуск энергии на единицу расхода аккумулированного воздуха, рассчитанный по формуле (3), составил 0,222 кВт·ч/кг. Выработка электрической энергии ВАГТЭ составила 478,6 МВт·ч/сут. Плотность воздуха при изменении давления рассчитывалась с использованием уравнения Ван-дер-Ваальса.

Далее были проведены расчеты по определению изменений показателей работы ВАГТЭ с АБХМ при варьировании температуры сжатого воздуха, добавочно охлажденного после дополнительного охладителя сжатого воздуха.

В табл. 1 представлены технико-экономические показатели оборудования ВАГТЭ с АБХМ при различных значениях температуры сжатого воздуха после добавочного охладителя перед воздушным аккумулятором ($t_{\text{доб}}$).

Из табл. 1 видно, что добавочное снижение температуры сжатого воздуха перед воздушным аккумулятором до 30–20°C, по сравнению с исходным вариантом, когда температура сжатого воздуха составляла 40°C, приводит к увеличению расхода закачиваемого воздуха, соответственно, на 22896–45792 кг/сут. Это, в свою очередь,

сопровождается как дополнительной выработкой электроэнергии ВАГТЭ на 5073,13–10146,26 кВт·ч/сут, так и увеличением расхода топлива в камеру сгорания газовой турбины на 817,15–1634,3 кг/сут.

Таблица 1

Технико-экономические показатели оборудования ВАГТЭ с АБХМ при различных значениях температуры сжатого воздуха после добавочного охладителя

Показатель	Температура сжатого воздуха, добавочно охлажденного после дополнительного охладителя сжатого воздуха, °С		
	30	25	20
Удельный расход аккумулируемого воздуха, $g_{ак}$, кг/м ³ (по ф-ле (2))	0,2052	0,2062	0,2071
Дополнительная выработка электроэнергии, кВт·ч/сут (по ф-ле (8))	5073,13	7609,7	10146,26
Увеличение расхода закачиваемого воздуха, кг/сут	22896	34344	45792
Увеличение расхода топлива в камеры сгорания газовой турбины, кг/сут	817,15	1225,73	1634,3
Капиталовложения в связи с установкой АБХМ на промышленной площадке ВАГТЭ, млн. руб. (по ф-ле (10))	35,45	53,18	70,98
Капиталовложения в компрессор, млн. руб.	2004,2	2017,7	2025,2
Увеличение капиталовложений в новый профиль компрессора, млн. руб	21,02	31,53	42,043
Капиталовложения в газовую турбину, млн. руб.	3066,38	3082,5	3098,55
Увеличение капиталовложений в новый профиль газовой турбины, млн. руб	32,16	48,24	64,32

В случае изменения профилей компрессора и газовой турбины дополнительные капиталовложения составят, для принятых ценовых данных, в компрессор 21,02÷42,043, в газовую турбину – 32,16÷64,32 млн. руб. Удельные капиталовложения в компрессор для ВАГТЭ приняты на уровне 400, в газовую турбину – 250 долл/кВт, исходя из общей стоимости турбомашин одного из проектов ВАГТЭ [1].

В табл. 2 представлены изменения параметров АБХМ в составе ВАГТЭ при понижении температуры сжатого воздуха после добавочного охладителя, подключенного к испарителю АБХМ, с 30 до 20°С. Температура сжатого воздуха перед дополнительным охладителем в исходном варианте составляет 40°С.

Таблица 2

Параметры АБХМ в составе ВАГТЭ при понижении температуры сжатого воздуха после добавочного охладителя

Параметры АБХМ в составе ВАГТЭ	Температура сжатого воздуха, добавочно охлажденного после дополнительного охладителя сжатого воздуха, °С		
	30	25	20
Холодопроизводительность АБХМ, кВт	1477,35	2216,03	2954,7
Холодильный коэффициент	0,916	0,897	0,875
Суммарная поверхность АБХМ, м ²	738,22	1132,8	1574,11
Поверхность дополнительного охладителя сжатого воздуха, м ²	409,61	486,91	546,14

Увеличение глубины охлаждения сжатого воздуха с 30 до 20°С сопровождается двукратным ростом холодопроизводительности АБХМ, суммарная поверхность теплообмена АБХМ возрастает более чем в 2 раза – на 835,9 м². Здесь необходимо отметить, что при расчете поверхностей теплообмена АБХМ приняты следующие значения

коэффициентов теплопередачи K : в испарителе $K_{и} = 1500$; в генераторе $K_{г} = 700$; в конденсаторе $K_{к} = 1200$; в абсорбере $K_{аб} = 800$ [2].

Расчет величины суммарных капиталовложений АБХМ выполнен исходя из удельной стоимости (включая все составляющие формулы (10)) на единицу холодопроизводительности – 400 долл/кВт, укрупнено принятой по данным фирмы *Lessar*.

Расчеты экономической эффективности, с использованием критерия ЧДД и других интегральных показателей экономической эффективности, проводились по формулам (4) – (6) для горизонта расчета 25 лет и при следующих соотношениях тарифов на пиковую и ночную электроэнергию:

$$T' = \frac{T_{п}}{T_{н}} = 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5. \quad (11)$$

В качестве исходного значения для тарифа на пиковую электроэнергию принято значение $T_{п} = 2,25$ руб/кВт·ч, для ночного тарифа – $T_{н} = 1,5$ руб/кВт·ч.

Для принятых исходных данных варианты ВАГТЭ, связанные с изменениями профилей компрессора и газовой турбины, сопровождаются значительными капиталовложениями, что приводит к отрицательной величине прироста ЧДД от внедрения АБХМ в схеме ВАГТЭ.

В табл. 3 представлены технико-экономические показатели от внедрения АБХМ в схеме ВАГТЭ для варианта сохранения профилей компрессора и газовой турбины при увеличении времени работы в режимах зарядки и разрядки. Данный расчет выполнен при соотношении тарифов на пиковую и ночную электроэнергию $T' = 3$ и для температуры сжатого воздуха 20°C , добавочно охлажденной после дополнительного охладителя сжатого воздуха. Как видно из табл. 3, снижение температуры сжатого воздуха при использовании АБХМ на 20°C позволяет дополнительно закачать его в воздушный аккумулятор в количестве 45792 кг/сут. Использование этого количества сжатого воздуха в часы пика электрической нагрузки позволит дополнительно выработать 10146,26 кВт·ч/сут, по сравнению с вариантом без добавочного охлаждения сжатого воздуха с использованием АБХМ. И, кроме этого, увеличится расход топлива, подаваемый в камеры сгорания газовой турбины, на 571,62 т/год. Пропуск данного дополнительного количества сжатого воздуха, при неизменных профилях проточных частей компрессора и газовой турбины, потребует увеличить время работы в режимах зарядки и разрядки на 0,085 ч/сут. Дополнительные капиталовложения в АБХМ, дополнительный охладитель сжатого воздуха и в реконструкцию градирни составят 70,9128 млн руб. В целом прирост чистого дисконтированного дохода, для принятого горизонта расчета, составит 10,745 млн. руб, а себестоимость дополнительно выработанной электроэнергии – 0,59 руб/кВт·ч.

На рис. 2 показана динамика изменения прироста ЧДД от внедрения АБХМ в схему ВАГТЭ для варианта постоянных профилей компрессора и газовой турбины при различных соотношениях тарифов на пиковую и ночную электроэнергию. При T' от 1,5 до 2,5 наблюдаются отрицательные значения прироста ЧДД. При увеличении соотношения тарифов T' до 3 и 3,5 Δ ЧДД становится положительным и возрастает в 3,03 раза для всех температур добавочно охлажденного воздуха $t_{доб}^{вых}$.

Технико-экономические показатели от внедрения АБХМ в схему ВАГТЭ для варианта сохранения профилей компрессора и газовой турбины при $T' = 3$

Показатель	Единица измерения	Значение
Температура после добавочного охладителя	°С	20
Дополнительное количество закачиваемого воздуха	кг/сут	45792
Дополнительная выработка электрической энергии по сравнению с вариантом без АБХМ	кВт·ч/сут	10146,26
Увеличение расхода условного топлива	тут/год	571,62
Затраты на дополнительное топливо	млн.руб/год	1,715
Дополнительные затраты на привод компрессора	млн.руб/год	3,153
Увеличение времени работы	ч/сут	0,085
Капиталовложения в АБХМ	млн.руб	70,9128
Прирост дохода в 1-й год эксплуатации АБХМ	млн.руб/год	12,971
Δ ЧДД	млн.руб	10,745
ИД	руб/руб	0,15
ВНД	-	0,12
Себестоимость дополнительно выработанной электроэнергии	руб/кВт·ч	0,59

Для всего диапазона охлаждения сжатого воздуха от 30 до 20 °С прирост ЧДД (по сравнению с исходным вариантом, когда температура сжатого воздуха составляла 40°С) возрастает в 2 раза при каждом из соотношений тарифов на пиковую и ночную электроэнергию $T' = 3; 3,5$.

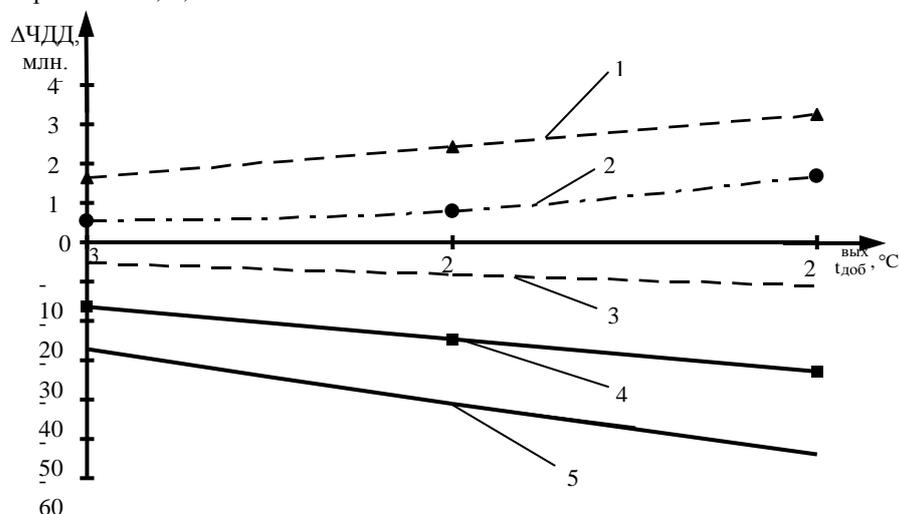


Рис. 2. Изменение прироста ЧДД от внедрения АБХМ в схему ВАГТЭ для варианта постоянных профилей компрессора и газовой турбины при T' : 1– 3,5; 2 –3,0; 3 – 2,5; 4 –2,0; 5 –1,5

Заключение

1. Предложена схема воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанции с использованием в период спада электрической нагрузки абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) для добавочного охлаждения сжатого воздуха в дополнительном охладителе перед воздушным аккумулятором.

2. Проведенный предварительный технико-экономический анализ возможных вариантов изменения в составе и длительности работы компрессорного и турбинного оборудования ВАГТЭ в связи с дополнительным снижением температуры сжатого воздуха при использовании АБХМ на 10–20°C показал следующее. Для принятых исходных данных варианты ВАГТЭ, связанные с изменениями профилей компрессора и газовой турбины, сопровождаются дополнительными капиталовложениями и по этой причине оказываются менее эффективными. Вариант с установкой АБХМ в схему ВАГТЭ, при котором профили компрессора и газовой турбины не меняются, а изменяется лишь продолжительность их работы, могут сопровождаться увеличением прироста ЧДД во всем диапазоне охлаждения сжатого воздуха при соотношении тарифов на пиковую и ночную электроэнергию $T^v = 3 \div 3,5$.

Литература

1. Ольховский Г.Г. Воздушно-аккумулирующие газотурбинные электростанции (ВАГТЭ) / Г.Г. Ольховский, В.А. Казарян, А.Я. Столяревский М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011. 358 с.
2. Абсорбционные преобразователи теплоты: монография / А.В. Бараненко, Л.С. Тимофеевский, А.Г. Долотов, А.В. Попов. СПб.: СПбГУНИПТ, 2005. 338 с.
3. Патент № 2529615 РФ, МПК F 01K 25/06. Способ аккумулирования энергии / А.Я. Столяревский. № 2013128027/06; заявл. 20.06.2013; опубл. 27.09.2014. Бюл. № 27.
4. Патент № 2574105 РФ, МПК F01K 3/00. Способ и система для улавливания тепловой энергии в системе производства электроэнергии (варианты) / Анихинди Санджай, Косамана Бхаскара. № 2011143463/06; заявл. 28.10.2011; опубл. 10.09.2016. Бюл. № 25.
5. Абсорбционные тепловые насосы в тепловой схеме ТЭЦ для повышения её энергетической эффективности / В.Н. Романюк и др. // Энергия и менеджмент. 2013. № 1. С. 15–20.
6. Анализ COP термодинамического цикла АБХМ с двухступенчатой абсорбцией при получении отрицательных температур охлаждения / К.И. Степанов и др. // Вестник МАХ. 2016. № 1. С. 86–92.
7. Comparison of compressed air energy storage process in aquifers and caverns based on the Huntorf CAES plant / Ch. Guo, L. Pan, K. Zhang, C.M. Oldenburg, C. Li, Y. Li // Applied Energy. 2016. 181(1). P. 342–356; doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.105.
8. Exergy and Exergoeconomic Model of a Ground-Based CAES Plant for Peak-Load Energy Production / F. Buffa, S. Kemble, G. Manfrida, A. Milazzo // Energies. 2013. № 6 (2). P. 1050–1067; doi: 10.3390/en6021050.
9. Modelling and analysis of a novel compressed air energy storage system for trigeneration based on electrical energy peak load shifting / S. Lv, W. He, A. Zhang, G. Li, B. Luo, X. Liu // Energy Conversion and Management. 2017. 135 (1). P. 394–401; doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.089.
10. Y. Mazloun. Dynamic modeling and simulation of an Isobaric Adiabatic Compressed Air Energy Storage (IA-CAES) system / Y. Mazloun, H. Sayah, M. Nemer // Journal of Energy Storage. 2017. 11. P. 178–190; doi.org/10.1016/j.est.2017.03.006.
11. Analysis and optimization of a compressed air energy storage – combined cycle system / W. Liu, L. Liu, L. Zhou, J. Huang, Y. Zhang, G. Xu, Y. Yang // Entropy. 2014. 16 (6). P. 3103–3120; doi: 10.3390/e16063103.
12. Energetic and Exergetic Analysis of some Models of Vapor Absorption Chillers Using Lithium Bromide and Water / Mohd Mairaj, Suhail. A. Siddiqui, Adnan Hafiz // Journal of Basic and Applied Engineering Research. 2015. 2 (4). P. 326–329.
13. Energetic analysis of single stage lithium bromide water absorption refrigeration system / Haresh A. Patel, L.N. Patel, Darshan Jani, Amit Christian // Procedia Technology. 2016. 23. P. 488–495; doi.org/10.1016/j.protcy.2016.03.054.

Авторы публикации

Аминов Рашид Зарифович – д-р техн. наук, профессор, руководитель Отдел энергетических проблем Саратовского научного центра (ОЭП СНЦ РАН) Профессор кафедры «Тепловая и атомная энергетика» им. А.И. Андрущенко Саратовского государственного технологического университета (СГТУ) им. Гагарина Ю.А. E-mail: oepran@inbox.ru.

Новичков Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Тепловая и атомная энергетика» им. А.И. Андрущенко Саратовского государственного технического университета (СГТУ) им. Гагарина Ю.А. E-mail: novishkovsv@mail.ru.

References

1. Ol'khovskii G.G. Vozdushno-akkumuliruyushchie gazoturbinnnye elektrostantsii (VAGTE) / G.G. Ol'khovskii, V.A. Kazaryan, A.Ya. Stolyarevskii M.: RGU nefti i gaza imeni I.M. Gubkina, 2011. 358 p.
2. Absorbtsionnye preobrazovateli teploty: monografiya / A.V. Baranenko, L.S. Timofeevskii, A.G. Dolotov, A.V. Popov. Spb.: SPbGUNIPT, 2005. 338 p.
3. Patent № 2529615 RF MPK F 01K 25/06. Sposob akkumulirovaniya energii / A.Ya. Stolyarevskii – № 2013128027/06; zayavl. 20.06.2013; opubl. 27.09.2014 Byul. No. 27.
4. Patent № 2574105 RF MPK F01K 3/00. Sposob i sistema dlya ulavlivaniya teplovoi energii v sisteme proizvodstva elektroenergii (varianty) / Anikhindi Sandzhai, Kosamana Bkhaskara. № 2011143463/06; zayavl. 28.10.2011; opubl. 10.09.2016 Byul. No. 25.
5. Absorbtsionnye teplovye nasosy v teplovoi skheme TETs dlya povysheniya ee energeticheskoi effektivnosti / Romanyuk V.N. [i dr.] // Energiya i menedzhment. 2013. No. 1. P. 15–20.
6. Analiz COP termodinamicheskogo tsikla ABKhM s dvukhstupenchatoi absorbtsiei pri poluchenii otritsatel'nykh temperatur okhlazhdeniya / Stepanov K.I. [i dr.] // Vestnik MAKh. 2016. No. 1. P. 86–92.
7. Comparison of compressed air energy storage process in aquifers and caverns based on the Huntorf CAES plant / Ch. Guo, L. Pan, K. Zhang, C.M. Oldenburg, C. Li, Y. Li // Applied Energy. 2016. 181(1). P. 342–356; doi.org /10.1016/j.apenergy. 2016.08.105
8. Exergy and Exergoeconomic Model of a Ground-Based CAES Plant for Peak-Load Energy Production / F. Buffa, S. Kemble, G. Manfrida, A. Milazzo // Energies. 2013. No. 6 (2). P. 1050–1067; doi: 10.3390/en6021050.
8. Modelling and analysis of a novel compressed air energy storage system for trigeneration based on electrical energy peak load shifting / S. Lv, W. He, A. Zhang, G. Li, B. Luo, X. Liu // Energy Conversion and Management. 2017. 135 (1). P. 394–401; doi.org/10.1016/j.enconman. 2016.12.089.
9. Y. Mazloun. Dynamic modeling and simulation of an Isobaric Adiabatic Compressed Air Energy Storage (IA-CAES) system / Y. Mazloun, H. Sayah, M. Nemer // Journal of Energy Storage. 2017. 11. P. 178–190; doi.org / 10.1016/j.est.2017.03.006.
10. Analysis and optimization of a compressed air energy storage – combined cycle system / W. Liu, L. Liu, L. Zhou, J. Huang, Y. Zhang, G. Xu, Y. Yang // Entropy. 2014. 16 (6). P. 3103–3120; doi: 10.3390/e16063103.
11. Energetic and Exergetic Analysis of some Models of Vapor Absorption Chillers Using Lithium Bromide and Water / Mohd Mairaj, Suhail. A. Siddiqui, Adnan Hafiz // Journal of Basic and Applied Engineering Research. 2015. 2 (4). P. 326–329.
12. Energetic analysis of single stage lithium bromide water absorption refrigeration system / Haresh A.Patel, L.N.Patel, Darshan Jani, Amit Christian // Procedia Technology. 2016. 23. P. 488–495; doi.org /10.1016/j.protcy.2016.03.054.

Authors of the publication

Rashid Z. Aminov –Prof. head of Department of power problems of the Saratov Scientific center of the Russian Academy of Sciences. E-mail: oepran@inbox.ru.

Sergey V. Novichkov – Cand. Sci. (Tech.), senior lecturer. A.I. Andryushchenko Chair «Thermal and Nuclear

© Р.З. Аминов, С.В. Новичков

Power Plant» of the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. E-mail: novishkovsv@mail.ru

Дата поступления

11 июля 2017 г.