Обзорная статья

Применение абсорбционных холодильных машин на газотурбинных электростанциях

Мельников М.М.[1], **Игонин И.Д.**[1], **Волков Ю.Ю.**[1], **Сербин И.Н.**[2]
[1]ООО «СамараНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Самара, Россия; [2]ООО «РН-Юганскнефтегаз», Нефтеюганск, Россия
MelnikovMM@samnipi.rosneft.ru

Аннотация

Большая часть газотурбинных электростанций в летний период сталкивается с проблемой сезонных ограничений. При повышении температуры воздуха на входе в газотурбинную установку (ГТУ) объем вырабатываемой электрической мощности снижается, а объем потребления газа повышается. Это обуславливается снижением плотности воздуха и топливно-воздушной смеси в целом, при этом снижается массовый расход воздуха перед камерой сгорания. В статье рассматривается технико-экономическая оценка применения АБХМ как решения по снижению влияния сезонных ограничений на ГТУ.

Материалы и методы
Методы оценки холодопроизводительности АБХМ, оценка экономической эффективности.

Ключевые слова
абсорбционная холодильная машина, газотурбинная установка, газотурбинная электростанция, располагаемая мощность

Для цитирования
Мельников М.М., Игонин И.Д., Волков Ю.Ю., Сербин И.Н. Применение абсорбционных холодильных машин на газотурбинных электростанциях // Экспозиция Нефть Газ. 2025. № 6. С. 86–89.

Поступила в редакцию: 03.09.2025

Термин «располагаемая мощность» используется в электроэнергетике для учета ограничений на работу генерирующего оборудования и обеспечения надежного электроснабжения в незапланированных ситуациях. Располагаемая мощность — это установленная мощность генерирующего агрегата (электростанции) за вычетом ограничений его мощности. Например, если суммарная мощность генераторов системы равна 100 МВт, но часть из них находится в ремонте, то располагаемая мощность будет равна 90 МВт. Выделяют два основных ограничения, влияющие на снижение электрической мощности:

- сезонные ограничения, МВт;
- ремонтные ограничения, МВт.

В зависимости от климатических условий района расположения ГТЭС возникают сезонные ограничения установленной мощности (УМ), которые приводят к дополнительным операционным и капитальным затратам.

По статистике повышение температуры на каждые 10 °С приводит к падению располагаемой электрической мощности ГТУ в среднем на 8 %. Потери мощности могут достигать 17 % от номинального значения при достижении температуры наружного воздуха tн = 35 °С. В свою очередь потери электрической мощности в летний период приводят к необходимости покупки электроэнергии от сторонних источников либо дополнительным капитальным затратам на строительство более мощной газотурбинной электростанции (учитывающей потерю мощности в летний период).

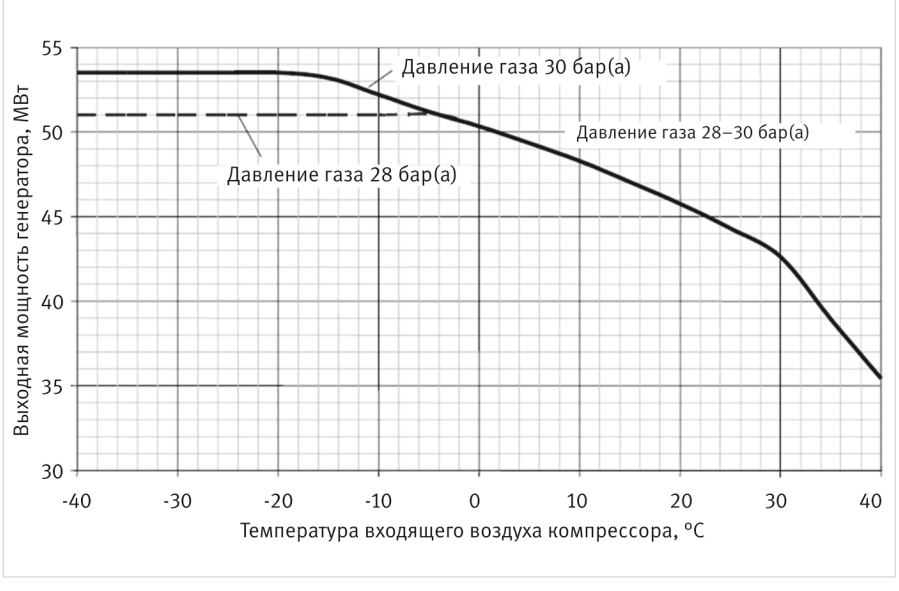

Рис. 1. Зависимость вырабатываемой электрической мощности от температуры наружного воздуха

Пример зависимости вырабатываемой электрической мощности от температуры наружного воздуха представлен на рисунке 1.

Существуют различные технические схемы охлаждения воздуха на входе в ГТУ, среди которых наиболее перспективными считаются схемы с применением абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин (АБХМ). Для ГТЭС чем выше температура наружного воздуха, тем больше эффект от установки АБХМ.

Цели данной работы:

- определение целесообразности повышения топливной эффективности за счет применения АБХМ на ГТЭС;
- определение целесообразности применения технологии АБХМ как типового проектного решения для ГТЭС.

Задачи:

- описание технологии работы АБХМ;
- оценка экономической эффективности применения АБХМ на примере Приобской ГТЭС;
- формирование выводов.

Актуальность и новизна:

- наличие сезонных ограничений установленной мощности;
- широкий опыт эксплуатации в других странах;
- возможность повышения топливной эффективности.

Принцип действия абсорбционной холодильной машины основан на определенных свойствах хладагента и абсорбента, которые обеспечивают отвод тепла, охлаждение и поддержание необходимого температурного режима.

АБХМ — это абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина (чиллер), работающая в основном за счет бросовой тепловой энергии. Источником тепловой энергии может служить горячая вода, дымовые газы, пар, природный газ и другие виды топлива. Выбор источника тепловой энергии,

а также конструктивные особенности самой АБХМ (одноступенчатые, двухступенчатые и т.д.) напрямую влияют на ее эффективность. Эффективность АБХМ оценивается таким параметром, как коэффициент холодопроизводительности (КПП, EER). Он отражает соотношение потребляемой и производимой энергии (мощности). Чем больше коэффициент, тем меньше энергии требуется для производства определенного количества холода, и наоборот.

Значения коэффициента в зависимости от типа АБХМ:

- 0,75–0,82 — для одноступенчатой АБХМ;
- 1,30–1,45 — для двухступенчатой;
- 1,9 — для трехступенчатой.

Принцип действия машины основан на следующих основных технологических процессах.

Охлаждение воды (испарение)

Вода-хладагент поступает в левую часть камеры — «Испаритель». Внутри, в условиях глубокого вакуума, происходит процесс кипения хладагента, который отводит тепло из охлаждаемой воды, циркулирующей по трубкам теплообменника.

Этот процесс непосредственно охлаждает воду, циркулирующую в теплообменнике («вода охлажденная»), и выполняет главную задачу, стоящую перед АБХМ, — режим охлаждения.

Абсорбция

Капли концентрированного раствора бромида лития подаются в правую часть камеры («абсорбер»), где абсорбируют пары воды-хладагента.

Для того чтобы не допустить повышения температуры бромида лития и потери его абсорбирующих свойств, необходима охлаждающая вода, которая стабилизирует его температуру.

Нагрев абсорбента (десорбация)

Раствор бромида лития, полученный после абсорбции, направляется в генератор при помощи насоса. Под воздействием тепла из него выкипает часть воды. Это восстанавливает изначальную концентрацию бромида лития в растворе, что нужно для поддержания его абсорбирующих свойств. Так работает АБХМ в режиме нагревания.

Конденсация хладагента

В конденсаторе происходит процесс конденсации пара хладагента, образовавшегося при кипении раствора в генераторе.

Далее эта вода-хладагент вновь попадает в «испаритель» (левую часть камеры), и цикл повторяется заново.

Во многих случаях абсорбционные холодильные машины позволяют радикально снизить эксплуатационные расходы на центральное кондиционирование и промышленное охлаждение за счет использования доступного альтернативного источника энергии, который часто бывает дешевле затрат на подключение и использование электрических мощностей.

Принципиальная схема АБХМ представлена на рисунке 2.

АБХМ имеют следующие потребительские свойства:

- высокая эффективность;
- экологическая чистота;
- низкий уровень шума при работе;
- простота обслуживания;
- длительный срок службы (не менее 25 лет);
- пожаро- и взрывобезопасность.

Проводя сравнение АБХМ с другими компрессионными холодильными машинами, выделяют следующие преимущества:

- незначительное потребление электроэнергии;
- в качестве энергоресурса могут использовать сбросное тепло;
- не имеют динамических нагрузок на фундамент;
- не используют экологически опасные рабочие вещества.

Помимо явных плюсов у АБХМ есть и свои слабые стороны, которые необходимо учитывать на стадии предпроектных решений:

- АБХМ имеют значительную массу и внушительные габаритные размеры, поэтому для их размещения и установки требуются большие площади, способные выдерживать вес блоков;
- более высокая стоимость оборудования в сравнении со стоимостью традиционного охладителя;
- для полноценной работы АБХМ необходимо использование открытого охладителя — градирни. Это значительно увеличивает водопотребление системы. Кроме того, работающая градирня производит шум, поэтому требуются дополнительные затраты на установку глушителей и акустических экранов.

Несмотря на перечисленные недостатки, АБХМ оцениваются как экономически более выгодные, чем традиционные холодильные машины других типов.

Анализ принципа действия АБХМ, ее преимуществ и недостатков позволяет определить возможные риски, связанные с эксплуатацией. К таким рискам следует отнести:

- отсутствие опыта эксплуатации, что может приводить к ошибкам персонала;
- промерзание теплообменников в зимний период, как следствие повреждение технологического оборудования с частичной или полной заменой;
- утечки теплоносителя (дополнительные затраты на восполнение потерь дорогостоящего теплоносителя).

Для устранения возможности возникновения первого риска персоналу необходимо пройти соответствующее обучение.

От второго риска удается полностью избавиться в случае использования в качестве хладоносителя этиленгликоля вместо воды.

Для контроля утечек возможна дополнительная установка отсечной арматуры и резервных линий теплоносителей с целью минимизации затрат на восполнение потерь.

На основании анализа рисков можно сделать вывод: вероятность возникновения и (или) степень опасности возможных рисков незначительны.

Также стоит учитывать, что при применении АБХМ, работающей на дымовых газах ГТУ, происходит общее снижение температуры дымовых газов, что приводит к снижению резерва температуры дымовых газов до точки росы (при значительном снижении температуры дымовых газов и пересечении точки росы возможно рассмотрение АБХМ меньшей мощности).

Существует два определяющих критерия возможности применения АБХМ на ГТЭС:

- наличие и величина сезонных ограничений;
- установленная мощность объекта.

Сезонные ограничения электрической мощности ГТЭС возникают при превышении температуры наружного воздуха $t_{возд} > 15$ °С. Для определения климатических условий региона расположения ГТЭС существует график температурного распределения средних из абсолютных максимумов температуры наружного воздуха (рис. 3). Предлагается рассмотрение возможности применения АБХМ для ГТЭС с сезонными ограничениями более 3 % от установленной мощности.

Согласно графику температурного распределения выделено два наиболее подходящих объекта:

- ГТЭС «Ванкорская» ($N_{уст}$ = 206,4 МВт);
- ГТЭС «Приобская» ($N_{уст}$ = 329 МВт).

ГТЭС «Приобская» находится в диапазоне 30–32 °С. ГТЭС «Ванкорская» находится севернее (средний из абсолютных температурных максимумов ниже 28 °С). Величина сезонных ограничений ГТЭС «Приобская» за 2024 г. составила 4 % от установленной мощности ЭСН. Сезонные ограничения ГТЭС «Ванкорская» за 2024 г. составили 2,5 % от установленной мощности.

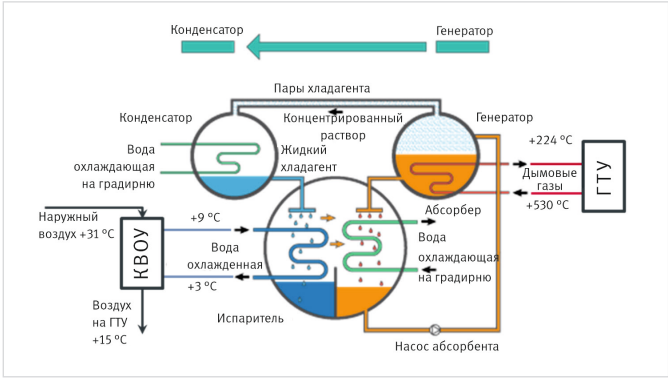

Рис. 2. Принципиальная схема АБХМ

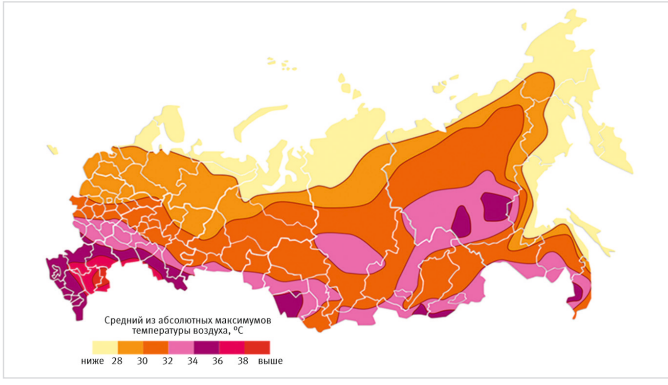

Рис. 3. График распределения среднего из абсолютных максимумов температуры воздуха

Также при выборе объекта следует учитывать установленную мощность основного генерирующего оборудования объекта. Чем выше установленная мощность, тем значительнее сезонные ограничения мощности, и тем больше экономический эффект от реализации проекта. Предлагается рассмотрение возможности применения АБХМ для ГТЭС с установленной мощностью более 50 МВт.

Исходя из основных критериев, а также анализа перечня газотурбинных электростанций, выявлено, что ГТЭС «Приобская» является наиболее подходящей в качестве объекта для определения целесообразности применения АБХМ.

В рамках оценки экономической эффективности составлен баланс электрической мощности для одной ГТУ. Единичная мощность ГТУ составляет 47 МВт. Среднегодовая рабочая — 40,6 МВт.

Ограничения мощности вызваны следующими факторами:

- повышением температуры наружного воздуха относительно номинальной (проектной) величины (сезонные ограничения) — 1,9 МВт;
- проведением капитальных ремонтов и инспекций (ремонтные ограничения) — 4,5 МВт.

Баланс электрической мощности одной ГТУ представлен на рисунке 4.

Табл. 1. Показатели экономической эффективности предлагаемого варианта

Наименование показателя	Предлагаемый вариант. Применение двухступенчатой АБХМ
NPV мероприятия повышения эффективности, тыс. руб.	20 403
IRR, %	25
Срок окупаемости, лет	7
Дисконтированный срок окупаемости, лет	11

В связи с возникновением сезонных ограничений годовая выработка электроэнергии сокращается на 117,5 млн кВт·ч.

По результатам расчета для решения данной проблемы предложено использовать двухступенчатую АБХМ, которая позволит контролировать температуру наружного воздуха перед комплексным воздухоочистительным устройством на уровне не выше 15 °С. Это позволит избавиться от сезонных ограничений.

Для оценки капитальных затрат приняты данные их технико-коммерческих предложений на поставку двухступенчатой АБХМ и блоков вентиляторных градирен (с учетом обвязки и вспомогательного оборудования).

Для оценки операционных затрат приняты данные из ТКП по обслуживанию и электрическим собственным нуждам АБХМ и вспомогательного оборудования; построена динамика роста тарифа на покупную электроэнергию от стороннего источника. Выбран объект-аналог для определения затрат на фонд оплаты труда (ФОТ).

Для определения эффекта от внедрения предлагаемого решения произведен расчет потенциальной мощности ГТУ с учетом работы двухступенчатой АБХМ. Расчет произведен с учетом средних значений температур в летний период в регионе Ханты-Мансийского автономного округа.

$$P = N_{со} \times t \times ЦЭ, \quad (1)$$

где P — эффект от реализации мероприятия, руб.; $N_{со}$ — потери мощности из-за сезонных ограничений, МВт; t — количество часов работы станции в летний период ($Т_{воздуха}$ > 15 °С); $ЦЭ$ — стоимость электроэнергии, $\frac{руб}{кВт \cdot ч}$.

По результатам расчета потенциальной электрической мощности составлен баланс электрической мощности одной ГТУ с применением АБХМ. УМ установки составляет 47 МВт. Среднегодовая рабочая составляет 42,5 МВт.

Ограничения УМ вызваны проведением капитальных ремонтов, инспекций и экспертиз (ремонтные ограничения) — 4,5 МВт.

Баланс электрической мощности одной ГТУ с применением АБХМ представлен на рисунке 5.

В результате удается полностью избавиться от сезонных ограничений установленной мощности в летний период.

Установка двухступенчатой АБХМ для охлаждения воздуха двух ГТУ увеличивает годовую выработку электроэнергии на 33,6 млн кВт·ч.

Макроэкономическая модель рассчитана на период 25 лет.

Показатели экономической эффективности предлагаемого варианта представлены в таблице 1.

Оценка экономической эффективности приведена для второго квартала 2025 г.

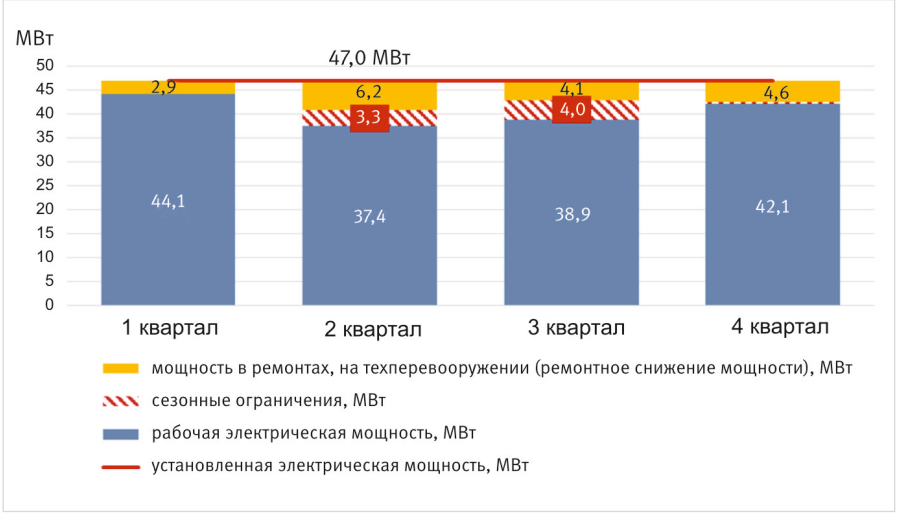

Рис. 4. Баланс электрической мощности одной ГТУ

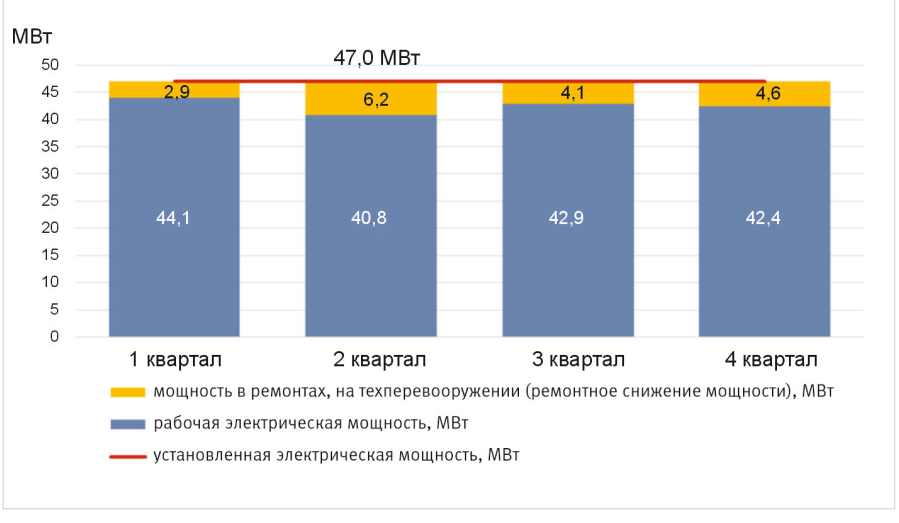

Рис. 5. Баланс электрической мощности одной ГТУ с применением АБХМ

Итоги

На основании представленной технико-экономической оценки предлагается рассмотреть АБХМ как техническое средство, позволяющее снизить влияние сезонных ограничений вырабатываемой электрической мощности в летний период.

АБХМ оценивается перспективным энергоэффективным решением для газотурбинных электростанций. Итоговое решение о применении АБХМ необходимо принимать для каждого объекта отдельно на основании технико-экономической оценки.

Выводы

Исходя из вышеописанных исследований, АБХМ на дымовых газах ГТУ оценивается

эффективным решением в рамках повышения энергоэффективности объекта генерации. Решение позволит увеличить отпуск электроэнергии потребителю и снизить операционные затраты на покупку электроэнергии от стороннего источника.

Подобный проект реализован в Казахстане на ГТЭС «Жанажолская». Для охлаждения воздуха перед комплексным воздухоочистительным устройством использовали двухступенчатую АБХМ с холодопроизводительностью 3 150 кВт. Использование АБХМ позволило повысить эффективность турбины в среднем на 30 % в теплое время года.

Литература

1. Бараненко А.В., Тимофеевский Л.С., Долотов А.Г., Попов А.В. Абсорбционные преобразователи теплоты. СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. 337 с.
2. Орехов И.И., Тимофеевский Л.С., Караван С.В. Абсорбционные преобразователи теплоты. Л.: Химия, 1989. 208 с.
3. Корольков А.Г., Попов А.В. Абсорбционные бромистолитиевые водоохлаждающие и водонагревательные трансформаторы теплоты // Проблемы энергосбережения. 2003. № 1. С. 13–17.
4. Волкова О.В. Повышение надежности абсорбционных бромистолитиевых преобразователей теплоты путем применения ингибиторов коррозии // Холодильная техника. 2001. Т. 90. № 8. С. 14–16.
5. Бараненко А.В., Попов А.В., Тимофеевский Л.С. Энергосберегающие абсорбционные бромистолитиевые водоохлаждающие и водонагревательные преобразователи теплоты и инженерные системы // Инженерные системы. 2001. № 4.
6. Попов А.В. Анализ эффективности различных типов тепловых насосов // Энергосбережение. 2005. № 1–2. С. 10–14.
7. Новоселов А.М., Попов А.В. Холодильная установка нового поколения для оптимизации температурного режима электролиза хрома // Металлург. 2005. № S1. С. 45–46.
8. Галимова Л.В., Славин Р.Б., Попов А.В. Энергосберегающая система на базе парогазотурбинной установки и абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины нового поколения // Холодильная техника. 2007. № 2. С. 42–43.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мельников Михаил Михайлович, руководитель теплотехнической группы, ООО «СамараНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Самара, Россия
Для контактов: MelnikovMM@samnipi.rosneft.ru

Игонин Иван Дмитриевич, ведущий инженер, ООО «СамараНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Самара, Россия

Волков Юрий Юрьевич, главный специалист, ООО «СамараНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Самара, Россия

Сербин Игорь Николаевич, главный менеджер, ООО «РН-Юганскнефтегаз», Нефтеюганск, Россия

INTECH

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
13–17 ОКТЯБРЯ 2025 г. Адлер

«Инновации в технологиях бурения, освоения, ремонта нефтяных и газовых скважин. КРС, ГНКТ, ГРП, ПНП, ВСР и супервайзинг. ОТ и ПБ на ОПО нефтегазовой отрасли»

+7 3452 520-958
бронирование участия в конференциях
academy.intechnol.com

Генеральный информационный партнер
ЭКСПОЗИЦИЯ НЕФТЬ ГАЗ