

Повышение экономичности ГТУ путем охлаждения циклового воздуха на входе в КВОУ

**А. Р. Богдан, В. И. Быличкин – ООО «Пауэр Инжиниринг Технолоджиз»
В. Д. Буров, к.т.н. – ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»**

В статье рассмотрен способ повышения эффективности и экономичности работы газовой турбины за счет охлаждения воздуха на входе в осевой компрессор. Повышение экономичности ГТУ в период высоких температур наружного воздуха позволяет генерирующим компаниям снизить убытки, связанные с невыработкой электроэнергии.

In brief Gain in performance of gas turbine plants by means of cycle air cooling at the inlet of air filter unit.

The article presents the way of gas turbine plants efficiency and performance enhancement by means of cycle air cooling at the inlet of axial compressor. Gain in performance of gas turbine plant during the period of high ambient air temperatures gives the opportunity to generating companies to reduce the financial expenditures connected with electric power underproduction. The present article is concerned with the influence of main parameters of ambient air to gas turbine plants performance. The authors analyzed the actuality of cycle air cooling for gas turbine plants and combined cycle power stations. Careful consideration is also given to the main principles of cycle air cooling. The article presents also the review of the most widespread cycle air cooling systems and their benchmarking study. All advantages and challenges of each system were distinguished by the authors.

В настоящий момент основной задачей развития тепловой генерации является техническое перевооружение и реконструкция действующих электростанций, а также ввод новых генерирующих мощностей с использованием передовых технологий в производстве электроэнергии.

Считается, что применение различных систем охлаждения циклового воздуха на входе в осевой компрессор актуально только для стран с жарким климатом. Однако разнообразие климатических условий на территории Российской Федерации позволяет достигать высокого экономического эффекта при реализации таких проектов. Для каждого отдельно взятого объекта необходимо детально проработать перспективу установки системы охлаждения воздуха ГТУ.

В статье рассматривается, как влияют основные показатели наружного воздуха на характеристики энергоустановок. Проанализирована актуальность охлаждения воздуха на ГТУ и ПГУ в России, рассмотрены основные принципы охлаждения воздуха. Приведен обзор самых распространенных систем охлаждения циклового воздуха и дан их сравнительный анализ, выделены преимущества и недостатки каждой из систем. Сформулированы критерии, которые следует учитывать при выборе системы охлаждения. Предложена принципиальная схема подключения охлаждающего оборудования к энергоблоку.

На базе реализованного проекта в компании «Мосэнерго» показано влияние системы охлаждения на основные эксплуатационные показатели ГТУ Siemens SGT5-4000F и параметры наружного воздуха (проект подробно представлен в «Тид». 2019, №5).

Тепловые электростанции будут долго оставаться основным генерирующим источником в стране, поэтому эффективность энергоснабжения потребителей в значительной степени будет определять технический уровень основ-

ного оборудования теплоэлектростанций [1]. По состоянию на конец 2019 года 15,95 % мощности ТЭС в России представлено электростанциями с парогазовыми установками [2]. Ввод парогазовых блоков является перспективным направлением развития энергетики и позволяет повысить коэффициент полезного действия установок более чем на 50 %.

В отличие от паросиловых установок, работа энергетической ГТУ существенно зависит от параметров наружного воздуха [3, 4]. Колебания давления наружного воздуха на действующих установках происходят в ограниченных пределах, не оказывая значительного влияния на работу ГТУ. Еще меньшее влияние оказывает влагосодержание рабочего тела.

Наиболее существенно влияет на работу энергоустановки изменение температуры наружного воздуха. Так, при снижении температуры увеличивается плотность воздуха, его расход через компрессор, электрическая мощность ГТУ и электрический КПД установки. На рис. 1 показано изменение относительной мощности и КПД газовой турбины SGT5-4000F

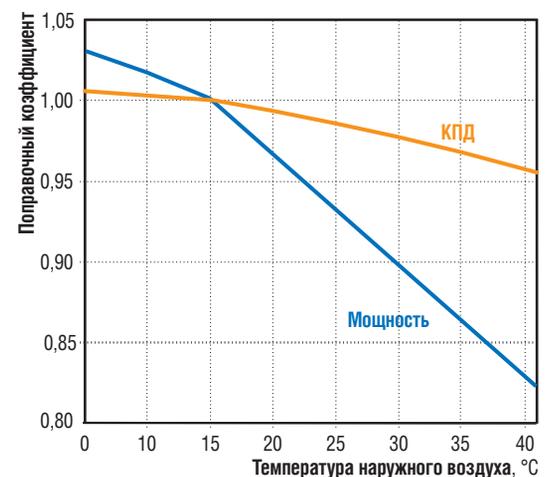


Рис. 1. Зависимость относительной мощности от температуры наружного воздуха

компании Siemens в зависимости от температуры наружного воздуха.

Для лучшего понимания проблемы приведем пример в цифрах. Повышение температуры воздуха на входе в компрессор с 15 до 30 °С снизит мощность ГТУ на 11,4 % – с 278,0 МВт до 249,5 МВт (при постоянстве остальных параметров).

Мощность ГТУ соответствует номинальному значению при стандартных внешних условиях: температуре наружного воздуха 15 °С, барометрическому давлению 101,325 кПа и относительной влажности 60 % [5]. Диспетчерский график электрических нагрузок составляется исходя из аттестованной (установленной) мощности ГТУ, полученной при стандартных условиях.

Повышение температуры воздуха приводит к снижению мощности ГТУ ниже аттестованного значения, в результате чего снижается и маржинальная прибыль от продажи электроэнергии и мощности. Данная проблема наиболее актуальна в тех случаях, когда заключен договор о предоставлении мощности (ДПМ). С учетом продолжительности периода высоких температур наружного воздуха в течение 3–5 месяцев экономические потери от сокращения производства электроэнергии с низким удельным расходом топлива оказываются весьма значительными.

В условиях роста электропотребления стабилизировать номинальную мощность ГТУ за счет повышения начальной температуры газов нецелесообразно из-за снижения ресурса дорогостоящих лопаток. Одним из способов повышения эффективности ГТУ является снижение внутренней мощности компрессора.

В зимний период эксплуатации при низких температурах атмосферного воздуха снижается его расход на единицу мощности ГТУ и, следовательно, потребляемая компрессором мощность. Таким образом, снижение температуры забираемого из атмосферы воздуха позволяет повысить электрическую мощность и электрический КПД установки.

Относительно простое решение, не требующее кардинальных конструктивных изменений, – разместить во входном канале воздухозаборного устройства испарительный охладитель или теплообменные поверхности специального холодильного агрегата. Мощность энергоблока можно повысить на 5...10 %, используя преимущества систем охлаждения воздуха [6]. Охлаждение воздуха на входе в ГТУ широко применяется для повышения КПД и мощности энергоблоков, прежде всего, в странах с жарким климатом.



☞ **Металлоконструкция испарительной системы охлаждения на ТЭЦ-20 ПАО «Мосэнерго»**

Территория Российской Федерации охватывает четыре климатических пояса, и климатические условия здесь разнообразны. В связи с этим построенные в России ГТУ не оснащались системами охлаждения воздуха, что значительно снижало затраты на их монтаж и установку. К тому же вырабатываемой в то время мощности энергоустановки было достаточно.

Существуют два основных способа охлаждения воздуха: а) охлаждение при испарении; б) посредством теплопередачи. В основе первого способа лежит физическое явление охлаждения воздуха за счет испарения капель воды. Испарение жидкости в окружающий воздух происходит за счет скрытой теплоты, необходимое количество которой берется из окружающей среды. При испарении воды влажный термометр сравнивается с сухим, полученное значение соответствует потенциалу охлаждения при испарении. Чем больше разность двух температур, тем больше эффект охлаждения.

Охлаждение при испарении приводит к увеличению влагосодержания (отношение массы влаги к массе сухого воздуха) и относительной влажности воздуха соответственно. Температура воздуха после системы охлаждения рассчитывается согласно формуле

$$T_2 = T_1 - GE \cdot (T_1 - T_{\text{влаж}}),$$

где T_1 – температура сухого термометра перед системой охлаждения; T_2 – температура воздуха после системы охлаждения; $T_{\text{влаж}}$ – температура влажного термометра; GE – эффективность насыщения (КПД испарителя).

Основным недостатком данной системы является то, что уровень охлаждения ограни-

Табл. 1. Преимущества и недостатки различных систем охлаждения

Испарительная система	Впрыск деминерализованной воды	Абсорбционные холодильные машины
Преимущества		
<ul style="list-style-type: none"> • низкие капитальные затраты • низкие затраты на ремонт и обслуживание • быстрый монтаж • возможность работать на воде низкого качества • дополнительная ступень фильтрации • отсутствие негативного влияния на проточную часть ГТУ 	<ul style="list-style-type: none"> • низкие капитальные затраты • быстрый монтаж • более глубокое охлаждение по сравнению с испарительной системой 	<ul style="list-style-type: none"> • более глубокое охлаждение по сравнению с испарительной системой и впрыском • отсутствие негативного влияния на проточную часть
Недостатки		
<ul style="list-style-type: none"> • ограниченная глубина охлаждения • дополнительный перепад на входе в КВОУ (~140 Па) 	<ul style="list-style-type: none"> • ограниченная глубина охлаждения • требуется глубокая химическая подготовка воды • негативное влияние на проточную часть 	<ul style="list-style-type: none"> • высокие капитальные затраты • высокие затраты на ремонт и обслуживание • относительно долгое время монтажа; • дополнительный перепад на входе в КВОУ (~240 Па)

чен температурой влажного воздуха, то есть зависит от условий окружающей среды. Максимальная эффективность достигается в сухую и жаркую погоду, но при высокой относительной влажности она резко падает.

При реализации второго способа охлаждения происходит за счет передачи тепла от более нагретого циклового воздуха, поступающего на вход осевого компрессора ГТУ, менее нагретому рабочему телу, протекающему через поверхность теплообменника.

Среди известных способов охлаждения широкое распространение в мировой практике получили следующие системы:

- 1) испарительного типа (evaporative cooling system);
- 2) с впрыском деминерализованной воды на входе в осевой компрессор (wet-compression);

3) абсорбционные холодильные машины (absorption chiller).

В табл. 1 приведены основные преимущества и недостатки представленных систем охлаждения.

В табл. 2 обозначены основные факторы, которые следует учитывать при определении технико-экономической привлекательности каждого проекта по модернизации КВОУ с установкой системы охлаждения циклового воздуха на входе ГТУ [7].

Из всего вышесказанного следует, что наиболее целесообразным способом, требующим относительно низких капитальных вложений и оказывающим наименьшее негативное влияние, является охлаждение испарительного типа.

Табл. 2. Основные факторы при выборе системы охлаждения

Испарительная система	Впрыск деминерализованной воды	Абсорбционные холодильные машины
Капиталовложения в проект		
<ul style="list-style-type: none"> • подведение трубопровода сырой / технической воды • отведение дренажного трубопровода в систему канализации • включение в состав КВОУ ГТУ испарительного охладителя 	<ul style="list-style-type: none"> • подведение трубопровода деминерализованной воды • включение в состав КВОУ ГТУ распределительной системы трубопроводов высокого давления • организация антикоррозийной защиты лопаток компрессора 	<ul style="list-style-type: none"> • подведение трубопроводов технической воды к градирням оросительного типа • подведение трубопроводов горячей воды / пара • отведение линии конденсата пара после холодильной машины • включение в состав КВОУ многорядного теплообменника • организация площадки с фундаментами для установки холодильной машины и вспомогательного оборудования
Эксплуатационные затраты, связанные с системой охлаждения		
<ul style="list-style-type: none"> • электропотребление собственных нужд на насос низкого давления • стоимость сырой / технической воды 	<ul style="list-style-type: none"> • электропотребление собственных нужд на насос высокого давления • стоимость деминерализованной воды 	<ul style="list-style-type: none"> • электропотребление собственных нужд на цирк. насосы и градирни (вентиляторные градирни) • подпитка испарившейся воды (градирни оросительного типа)
Затраты на обслуживание системы охлаждения		
<ul style="list-style-type: none"> • регламентное обслуживание насосов • замена смачиваемого материала раз в 5-7 лет 	<ul style="list-style-type: none"> • регламентное обслуживание насосов • замена распылительных форсунок раз в 2-3 года 	<ul style="list-style-type: none"> • регламентное обслуживание холодильной машины и теплообменника
Отпуск электроэнергии		
<ul style="list-style-type: none"> • учет эффекта повышенного сопротивления на входе КВОУ в летнее время 	<ul style="list-style-type: none"> • учет поправочного коэффициента трансформации фактических часов в эквивалентные часы наработки ГТУ 1,1...1,3, связанный с эрозионно-коррозионными процессами 	<ul style="list-style-type: none"> • учет эффекта повышенного сопротивления на входе КВОУ круглогодично

В ноябре 2018 г. начались основные работы по проектированию, строительству и монтажу испарительной установки на блоке ПГУ-450 (ТЭЦ-20, Мосэнерго). Комплекс работ был завершен в рекордные сроки – менее года, и окончательные пусконаладочные работы были произведены в мае 2019 г.

Реализация проекта началась в 2015 г. с разработки технико-экономического обоснования компанией «Пауэр Инжиниринг Технолоджиз», специализирующейся на внедрении энергоэффективных решений на ПГУ. В 2017 г. экспертный совет ООО «Газпром энергохолдинг» утвердил решение о выполнении научно-исследовательской работы, где были проанализированы различные варианты систем охлаждения циклового воздуха ГТУ и доказана эффективность и целесообразность применения для снижения температуры воздуха на всасывании компрессоров ГТ установок охлаждения испарительного типа.

Принципиальная схема системы охлаждения испарительного типа приведена на рис. 2. Объем воды непрерывно подается насосом низкого давления в распределительный коллектор системы испарительного охлаждения. Вода равномерно стекает по пористому материалу, установленному в сечении воздушного канала КВОУ ГТУ. Воздух, проходя через смоченный материал, насыщается влагой до 97...98 %, охлаждается и после КВОУ направляется на вход компрессора ГТУ. Часть воды, которая не испарилась, поступает в нижний коллектор, откуда возвращается в аккумулирующий бак.

Предусматривается линия подпитки и дренажа для поддержания качества воды на заданном уровне. Подача воды автоматически прекращается при температуре воздуха ниже 12 °С. На осенне-зимний период материал демонтируется для снижения перепада на входе в КВОУ.

Существующие в настоящее время системы охлаждения испарительного типа позволяют использовать воду относительно низкого качества (техническая / сырая / водопроводная). В качестве источника воды на ТЭЦ-20 используется водопроводная вода. Технические характеристики испарительной установки (ИУ) на ТЭЦ-20 ПАО «Мосэнерго» приведены в табл. 3.

Испарительный охладитель, как правило, проектируется на эффективность насыщения не менее 88 %, для чего толщина кассет должна быть порядка 300 мм. За материалом можно установить сепаратор капель, однако при скорости воздуха менее 2,5 м/с и размещении системы охлаждения перед фильтрами в нем нет необходимости.

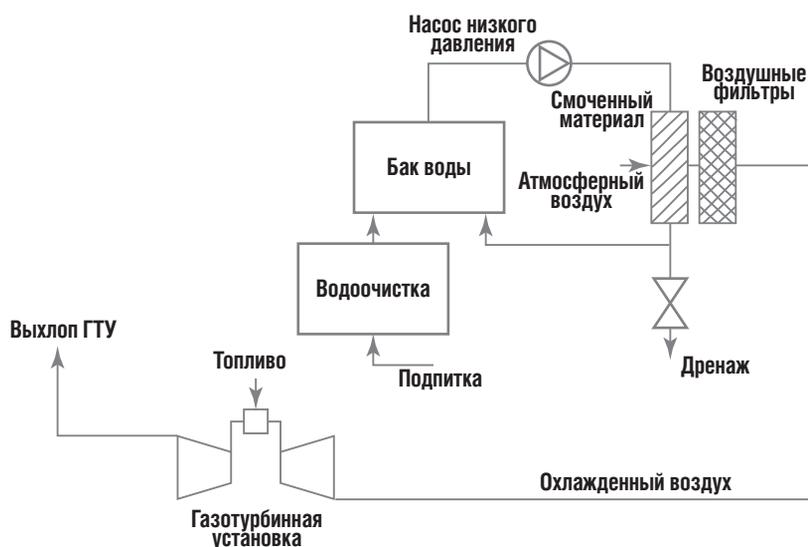


Рис. 2. Принципиальная схема работы системы охлаждения испарительного типа

Также между материалом и каплеуловителем может находиться площадка обслуживания шириной от 0,7 до 0,8 м. Таким образом, ширина всего модуля системы охлаждения не превышает 1,5 м. Аккумулирующий бак может располагаться как в цехе, так и под открытым небом, на нулевой отметке по отношению к установке.

Испарительная установка на блоке ПГУ-450 эксплуатировалась по фактическим погодным условиям, в том числе и в ночное время. По результатам эксплуатации система охлаждения испарительного типа получила наилучшие показатели эффективности и окупаемости:

- в момент первого включения при температуре наружного воздуха 18,5 °С и относительной влажности 51 % температура за ИУ

Табл. 3. Технические характеристики испарительной установки

Показатель	Значение
КПД, %	92,6
Перепад давления по воздушной части, Па	110
Расход воздуха, м³/с	583
Перепад давления по водяной части, МПа	0,15
Мощность собственных нужд, кВт	18,5
Количество секций, шт.	8
Габариты секции испарительного охладителя, м	8,35 x 3,46 x 0,05
Максимальный эксплуатационный вес, кг	47 000

Табл. 4. Изменение параметров наружного воздуха

Показатель, средние значения	май	июнь	июль	август	сентябрь
Температура воздуха без ИУ, °С	16,88	17,86	20,77	19,48	14,79
Влажность воздуха без ИУ, %	48,68	51,77	54,24	56,63	59,85
Температура воздуха с ИУ, °С	11,68	12,84	15,64	14,89	11,18
Влажность воздуха с ИУ, %	89,02	91,82	92,85	93,34	92,65
Увеличение мощности ГТУ, МВт	9,88	9,53	9,75	8,72	6,86

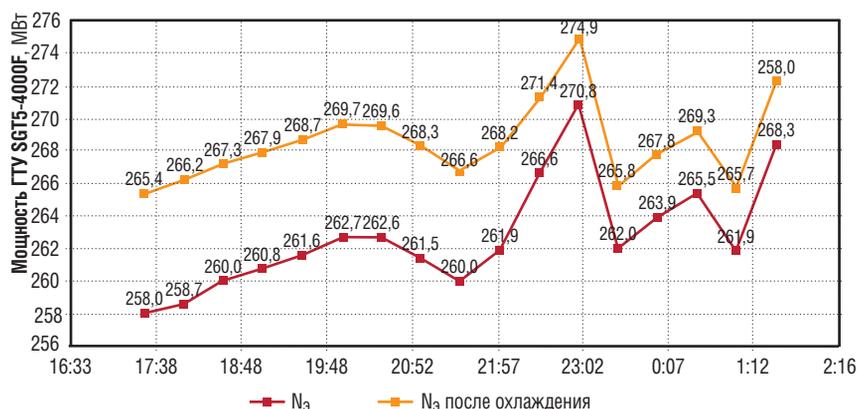


Рис. 3. Увеличение мощности ГТУ при работе системы охлаждения испарительного типа

составила 14,5 °С, а мощность блока выросла на 11 МВт;

- в рамках проведения испытаний по программе Системного оператора при температуре наружного воздуха 29 °С и относительной влажности 24 % температура за ИУ снижалась на 9,7 °С, а при отключении ИУ мощность блока снизилась на 19 МВт.

Для того чтобы подтвердить отсутствие негативного влияния на проточную часть ГТУ, сотрудники ПАО «Мосэнерго» после года эксплуатации установки выполнили осмотр проточной части компрессора ГТУ. В ходе осмотра замечаний не было. Изменение основных параметров наружного воздуха при использовании системы охлаждения показано в табл. 4 [8].

Изменение мощности ГТУ в разрезе одного дня (20 июня) при использовании системы охлаждения испарительного типа для ГТУ SGT5-4000F приведено на рис. 3.

Таким образом, внедрение технологий, снижающих температуру циклового воздуха на входе в осевой компрессор, позволяет повысить эффективность и экономичность ГТУ, а также увеличить прибыль от продажи электроэнергии и мощности.

Несмотря на технологические сложности, связанные с модернизацией существующего оборудования, оптимальный выбор системы охлаждения для КВОУ и эффективные меры по сокращению температурных ограничений позволяют достигать высокого экономического эффекта для электростанций и окупаться менее чем за семь лет. **TD**

Использованная литература

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. №1523-р.
2. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2019 году [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2020/ups_rep2019.pdf (дата обращения: 30.07.2020).
3. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. 2002.
4. Цанев С.В. и др. Газотурбинные энергетические установки // М.: Издательский дом МЭИ. 2011.
5. ГОСТ Р 55798-2013 (ИСО 2314: 2009 / ISO 2314: 2009)-2015.
6. Шахин Н.Н., Акул Х. Системы охлаждения воздуха на входе в газотурбинные установки // Турбины и Дизели. 2011, № 3. С. 8-11.
7. Анисимов С.Н., Круговых Д.Е., Молодкин Д.С. Повышение производительности ГТУ при высоких температурах наружного воздуха // Турбины и Дизели. 2013, № 6. С. 34.
8. Богдан А.Р., Леликов К.И., Быличкин В.И. Повышение мощности ГТУ за счет охлаждения циклового воздуха // Турбины и Дизели. 2019, № 5. С. 22.



Уральский турбинный завод модернизирует ПТУ на Краснодарской ТЭЦ.

Турбины предназначены для модернизации трех энергоблоков Краснодарской ТЭЦ в рамках программы обновления генерирующих объектов тепловых электростанций «ДПМ-2».

Новые турбины ПТ-150/160-12,8 заменят выработавшие ресурс машины производства ХТЗ, наработка которых составила более 400 тыс. часов при вдвое меньшем нормативе.

Первый комплект оборудования, в который входит турбина и конденсатор, будет поставлен к апрелю 2021 г., второй – к сентябрю 2022 г. и третий – к октябрю 2023 г. Ввод всех энергоблоков в эксплуатацию будет поэтапным и завершится к 2024 году.