

# Системы охлаждения воздуха на входе в газотурбинные установки

**Наши Шахин, Хасан Акул – Friterm A.S.**

Для стран с теплым климатом, а также южных регионов России повышение эффективности газотурбинных энергоустановок путем охлаждения подаваемого на вход воздуха очень актуально. Компания Friterm имеет большой опыт в разработке подобных воздухоохладителей, с учетом особенностей их производства и функционирования. При соблюдении всех правил эксплуатации обеспечивается быстрая окупаемость оборудования за счет повышения КПД и мощности энергоблоков, а также сокращения эксплуатационных расходов.

## In brief

### Combustion turbine inlet air cooling units used in power plants.

*For countries in the mild temperate zone such as Turkey, the efficiency offered by cooling turbine inlet air is beyond doubt. Increasing efficiency, maximizing production, thus reducing cost per unit is the crucial edge in today's competitive environment. Detailed knowledge of the materials, performance and construction properties of turbine air coolers, which self-finance its installation and operation costs with the increase in efficiency they provide; shunning applications with short life terms and relatively high risks of malfunction that are not in compliance with the criteria specified in the following article is quite important for investors of the energy sector. Cooling the combustion air in turbine-generator systems is a widely used method undisputable in its capacity of increasing total energy generation and the overall efficiency of the system.*

**О**хлаждение воздуха на входе в газотурбинные установки широко применяется для повышения КПД и мощности таких энергоблоков. Однако большое количество ранее созданных ГТУ не оснащались системами охлаждения воздуха на входе, что снижало затраты на их установку и монтаж. Кроме того, вырабатываемой в то время мощности энергоустановки было достаточно. Используя преимущества систем охлаждения воздуха в условиях роста электропотребления, мощность энергоблока такого типа можно повысить на 10-26 %, исключая собственные затраты мощности в системе, особенно в летний период.

Для установок, созданных в более поздний период, можно применять комплексы из систем испарительного охлаждения, систем непосредственного охлаждения с охлаждающей жидкостью или холодильных комплексов с охлаждающей батареей (испарителем) и собственным хладагентом.

Учитывая требования современного энергетического рынка, компания Friterm с 2001 года производит охлаждающие теплообменные радиаторы как часть комплексной поставки,

включая воздушные фильтры и блоки удаления капельной жидкости. Охлаждающие радиаторы – это высокоэффективные теплообменники, разработанные с использованием программного обеспечения Friterm Coils 5.5 FRT1. Они прошли полномасштабные испытания в независимых лабораториях и имеют международные сертификаты Eurovent.

Применение систем охлаждения воздуха в виде готовых блоков обеспечивает производителям энергоустановок ряд преимуществ не только с точки зрения экономии средств, но и соответствия параметров поставляемого оборудования условиям конкретной площадки. Чтобы избежать возможных ошибок при использовании систем охлаждения воздуха на существующих электростанциях, нужно в деталях понимать конструктивные и эксплуатационные особенности оборудования.

## Увеличение мощности ГТУ путем охлаждения подводимого воздуха

Практически все ГТУ имеют постоянный объемный расход воздуха. Таким образом, с повышением плотности воздуха, поступающего



Система охлаждения воздуха на входе в газовую турбину

в систему, увеличивается его масса, при этом повышается мощность установки. Значительные потери мощности ГТУ отмечаются в летний период. Но даже с учетом затрат энергии на охлаждение поступающего воздуха, используя данную систему, можно ощутимо увеличить электрическую мощность установки со снижением ее тепловой мощности.

Несмотря на то что вырабатываемая ГТУ мощность увеличивается практически линейно с понижением температуры воздуха, необходимо, чтобы она была не ниже 5...6 °С во избежание риска образования льда в воздушном тракте системы. Снижение температуры подаваемого в турбину воздуха с 38 °С до 17 °С предотвращает потенциальное снижение мощности ГТУ на 27 % при такой высокой температуре. Если воздух будет охлажден до 6 °С, то вырабатываемая мощность увеличится до 110 %. Соответственно, снижение температуры всасываемого воздуха с 38 °С до 6 °С обеспечит возрастание мощности ГТУ с 73 % до 110 % от номинала.

График изменения электрической и тепловой мощности газовой турбины в зависимости от температуры подводимого воздуха приведен на рис. 1. Изменение мощности в зависимости от температуры подводимого воздуха для ГТУ Frame 7B (GE), установленной на электростанции в г. Линкольн (США), приведено на рис. 2.

Номинальная мощность турбин обычно приводится для температуры воздуха 15 °С, относительной влажности 60 % и высоты над уровнем моря в соответствии с ISO. Данные по мощности для других условий эксплуатации можно получить у производителей оборудования. Для общих расчетов должны учитываться следующие факторы:

1. Каждое повышение температуры воздуха на 10 °С приводит к падению мощности на 8 %;
2. Увеличение высоты площадки ГТУ над уровнем моря на 300 м приводит к падению мощности на 3,5 %;
3. Каждая дополнительная потеря давления на 1 кПа в фильтрах, шумоглушителях и выхлопных газоходах вызывает снижение мощности на 2 %;
4. Дополнительные потери давления в котле-утилизаторе, шумоглушителе и газоходах на выходе приводят к снижению мощности на 1,2 %.

На рис. 3 показан типичный график изменения параметров газотурбинного двигателя мощностью 7,5 МВт.

При этом изменение КПД турбины на разных частотах вращения может рассматриваться как результат изменения температуры воздуха.

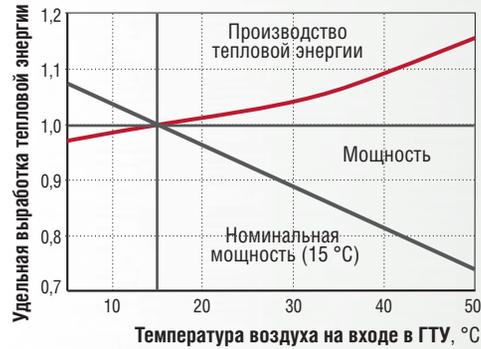


Рис. 1. Изменение электрической и тепловой мощности ГТУ в зависимости от температуры воздуха на входе



Рис. 2. Влияние температуры воздуха на мощность турбины Frame 7B на электростанции в г. Линкольн

### Преимущества и недостатки использования системы охлаждения

**Повышение мощности.** Охлаждение воздуха на входе в газовую турбину ниже 15 °С позволяет собственникам электростанции получить дополнительную прибыль за счет выработки дополнительного количества энергии.

**Повышение эффективности использования топлива.** Это одно из наиболее важных преимуществ использования системы охлаждения на входе ГТУ. При повышении температуры с 15 °С до 38 °С увеличивается удельный расход тепла, что в свою очередь приводит к снижению КПД на 4 %. Этот негативный фактор может быть устранен путем охлаждения воздуха, подаваемого в газовую турбину. Для стандартных ГТУ снижение температуры воздуха до 6 °С уменьшает удельный расход тепла и повышает КПД на 2 %. На рис. 4, 5 показано влияние температуры подаваемого воздуха на

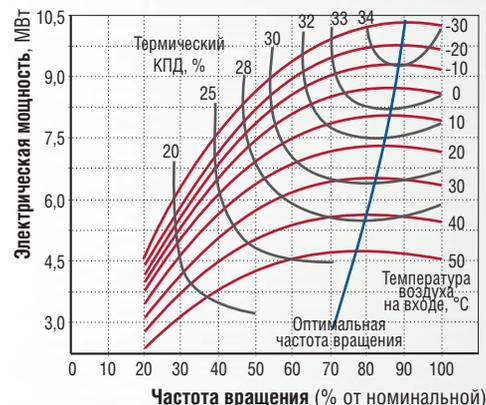


Рис. 3. Изменение эксплуатационных параметров в зависимости от температуры воздуха на входе в ГТУ

мощность и удельный расход тепла в авиапро-  
изводных и промышленных газовых турбинах.

**Продление срока службы компонентов газовых турбин.** Двигатели, работающие при низких температурах воздуха на входе, имеют более продолжительный срок службы и требуют технического обслуживания в меньшем объеме. Более низкие и стабильные температуры воздуха обеспечивают меньший износ компонентов турбин.

**Увеличение КПД в комбинированном цикле.** Низкие температуры подаваемого воздуха обеспечивают более низкие температуры выхлопных газов. Это, естественно, снижает мощность котла-утилизатора. Однако при большем расходе воздуха на входе увеличивается массовый расход выхлопных газов, что в достаточной мере компенсирует потерю мощности в связи со снижением температуры.

**Отсрочка в необходимости расширения электростанции.** Повысив мощность электростанции за счет использования системы охлаждения воздуха на входе, расширение станции путем увеличения количества энергоблоков можно перенести на более поздний срок.

**Повышение КПД системы при работе в базовом режиме.** Общий КПД системы можно повысить путем сохранения энергии холода в накопителях вода/лед с использованием электрического чиллера в периоды низкого энергопотребления. Наиболее эффективна работа электрических чиллеров в ночное время в связи с более низкими температурами в конденсаторе. При необходимости максимальной выработки электрической и тепловой энергии должны быть задействованы традиционные системы вместо систем накопления энергии.

**Отсутствие необходимости распыления воды или пара.** Распыление воды или пара используется для повышения массового расхода рабочего тела и снижения эмиссии  $\text{NO}_x$ . Однако в ряде случаев распыление пара приводит к снижению мощности турбины и повышению уровня эмиссии  $\text{CO}$ . Более низкие температуры подаваемого воздуха сокращают уровень эмиссии  $\text{NO}_x$  за счет снижения температуры воздуха, подаваемого в камеру сгорания. Таким образом, устраняется необходимость распыления воды или пара для снижения эмиссии  $\text{NO}_x$ . При использовании системы охлаждения воздуха на входе не требуется применения других технологий для повышения мощности ГТУ, которые приводят к повышению уровней эмиссии  $\text{CO}$ .

**Прогнозирование выработки энергии.** Ряд систем охлаждения обеспечивают эксплуатацию двигателя при температурах воздуха на входе ниже  $6^\circ\text{C}$  независимо от условий окружающей среды. Использование таких систем позволяет более точно прогнозировать количество вырабатываемой энергии, поскольку отсутствует наиболее часто изменяющийся фактор – температура окружающего воздуха.

Другие преимущества использования систем охлаждения воздуха на входе ГТУ:

- испаритель обеспечивает фильтрацию подаваемого воздуха;
- охлаждающий теплообменник конденсирует значительное количество воды для пополнения градирен или испарительных конденсаторов;
- система имеет простую конструкцию и может использоваться отдельно;
- температура воздуха на входе может быть изменена для достижения требуемой мощности ГТУ. При этом полное открытие входных направляющих аппаратов происходит без существенной потери давления.

К недостаткам применения системы охлаждения можно отнести такие факторы:

1. Для установки системы необходимо дополнительное пространство. Кроме того, она требует дополнительного обслуживания;
2. Охлаждающие змеевики и испарители устанавливаются на пути воздушного потока, что приводит к постоянным потерям давления.

При принятии решения по установке систем охлаждения воздуха на входе в ГТУ необходимо учитывать:

- тип газовой турбины – промышленная или авиапроизводная;
- климатические условия в регионе;
- соотношение расхода воздуха и мощности ГТУ;
- степень повышения мощности, которая может быть достигнута путем снижения температуры воздуха на входе в газовую турбину;

Рис. 4.  
Влияние изменения температуры окружающего воздуха на мощность ГТУ

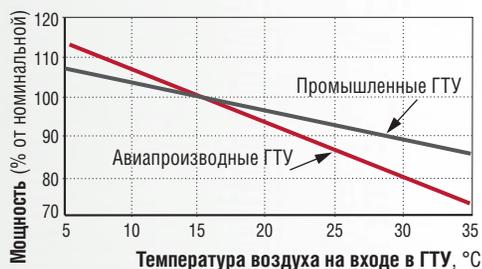
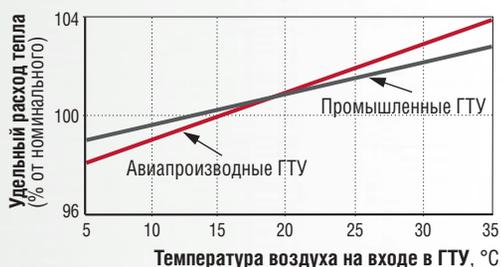


Рис. 5.  
Влияние температуры воздуха на удельный расход тепла в ГТУ



- технологии, используемые для охлаждения воздуха на входе;
- потери давления, в связи с установкой змеевиков и испарителей;
- используемая система контроля и управления;
- доступность и стоимость топлива;
- затраты на техническое обслуживание;
- тип системы сохранения энергии, график загрузки/разгрузки;
- цена электроэнергии на рынке и себестоимость выработанной электроэнергии.

## **Технологии охлаждения воздуха на входе ГТУ**

Кроме охлаждения воздуха на входе, впрыск воды или пара может использоваться в условиях с низкой влажностью окружающего воздуха. Существуют три основных способа охлаждения: испарительное; прямое охлаждение хладагентом; охлаждение вторичным хладоносителем (холодная вода – лед/соленая вода).

Для предварительного выбора системы охлаждения воздуха на входе необходимо учитывать продолжительность работы (график) турбины. Если ГТУ используется в качестве резервного источника энергии для снятия пиковых нагрузок, наиболее предпочтительны системы с испарительным охлаждением и системы накопления энергии. В этом случае отсутствуют избыточные потери нагрузки, за исключением потерь на работу циркуляционных насосов в период эксплуатации энергоустановки.

В тех случаях, когда ГТУ работает в основном в базовом режиме, использование таких систем охлаждения нежелательно. Решение об их применении должно приниматься только после тщательного анализа всех условий эксплуатации.

**Испарительное охлаждение.** В таких системах охлаждение достигается изменением состояния воды, которая подается в поток воздуха на входе в турбину. При этом необходимо смягчение воды в зависимости от ее качества в конкретном регионе. При использовании влажного охладителя воздух охлаждается на 85-95 % по разности температур сухого наружного и подаваемого в турбину влажного воздуха.

Основным недостатком данной системы является то, что уровень охлаждения ограничен температурой влажного воздуха, подаваемого в ГТУ, т.е. зависит от условий окружающей среды. Максимальная эффективность достигается в сухую и жаркую погоду, но при высокой относительной влажности она резко падает. Кроме того, при таком способе охлаждения потребляется значительное количество воды. Несмотря на это, система широко используется в связи со сравнительно низкой стоимостью.

**Охлаждение непосредственным испарением хладагента (DX cooling).** Хладагент циркулирует непосредственно в теплообменнике системы охлаждения воздуха. В этом случае может использоваться абсорбционный или парокомпрессионный цикл. Система должна обеспечивать покрытие пиковых потребностей при резком возрастании нагрузки в сети. При этом существует риск утечек хладагента, поскольку он циркулирует в теплообменнике, который находится на пути потока воздуха. В связи с этим такие системы не пользуются популярностью у заказчиков.

**Охлаждение вторичным хладоносителем (холодная вода – лед/соленая вода).** Такое охлаждение сочетается с системами сохранения энергии или с охлаждающими теплообменниками, хладагент в которые подается напрямую из чиллера. В этом случае система может охлаждать подаваемый воздух до более низкой температуры, чем при испарительном охлаждении, и поддерживает ее на уровне 6 °С.

В отличие от прямого охлаждения хладагентом, данные системы расходуют энергию насосов. В связи с тем что трубная обвязка систем прямого охлаждения хладагентом невелика (что обусловлено стандартными размерами чиллера), а холодная вода циркулирует в каналах под низким давлением более свободно по сравнению с первичным хладагентом, система практически защищена от утечек. Кроме того, она отличается простотой установки, обслуживания и эксплуатации. Такие системы наиболее предпочтительно использовать в ГТУ, работающих в базовом режиме в течение длительного времени.

В случае если данные системы применяются совместно с блоками хранения холодной воды или льда, они используются в периоды пиковых нагрузок. Для резервных ГТУ, работающих несколько часов в неделю, использование модулей сохранения энергии холода более предпочтительно. Более того, оно эффективно в случаях, когда потребление энергии постоянно изменяется или наблюдается частое колебание цен на вырабатываемую электроэнергию. Например, в выходные и праздничные дни энергии используется меньше, и ее стоимость падает – в рабочие дни, когда ее потребление возрастает, стоимость электроэнергии увеличивается.

Используя сохраненную энергию холода в периоды пиковых нагрузок и высокой стоимости, можно вырабатывать дополнительное количество электроэнергии и продавать ее на рынке. **□**

*Окончание статьи в следующем номере.*