

Франк Триш – Thermo Integral GmbH & Co. KG, г. Лейпциг

Гибридные системы кондиционирования воздуха (Hybrid combustion air conditioning – HCAC), применяемые в газовых турбинах, могут использоваться для целого ряда процессов, включая дополнительное охлаждение вторичных циклов, предварительный подогрев топлива и подготовку воздуха для горения.

Гибридная система кондиционирования воздуха для ГТУ

IN BRIEF

Hybrid combustion air conditioning.

In steady-state operation, gas turbines serve to drive electrical generators, gas compressors and fluid pumps. Their advantage relates to simple design, an extremely high power density, a long service life and the option of operation with various calorific values, advantages not afforded by piston machines. In recent years, it has been possible to increase the output and efficiency of gas turbines and reduce pollutant gas emissions in the waste gases in line with more stringent legislation. However, secondary processes of gas turbines continue to have an important optimization potential. Hybrid combustion air conditioning used in gas turbines can be applied for various processes including recooling of secondary cycles, preheating of fuel gas and combustion air treatment.

В настоящее время все чаще выдвигается требование по обеспечению возможности работы ГТУ с пониженной или повышенной мощностью, независимо от температуры наружного воздуха. В статье описан успешный опыт управления мощностью двигателя ГТУ за счет изменения температуры воздуха, проходящего через новый аппарат – гибридный теплообменник системы кондиционирования воздуха (HCAC) – в осевой компрессор. Рассматриваются существующие способы регулирования температуры воздуха, устройство HCAC и полученные на практике результаты применения системы.

Способы охлаждения подаваемого воздуха

Мощность и КПД газовой турбины с осевым компрессором в значительной степени зависят от температуры воздуха на его входе. Плотность и, соответственно, количество подаваемого из компрессора воздуха снижаются в случае увеличения его температуры на входе. Мощность и КПД двигателя при этом также уменьшаются (рис. 1).

Эти показатели в летний период можно увеличить путем искусственного охлаждения подаваемого воздуха. На практике используется пря-

мое и не прямое охлаждение воздуха. Прямое адиабатическое охлаждение водой включает:

- форсуночный впрыск воды в воздушный поток с использованием отдельных водоподводящих трубных систем высокого давления (практически исключается возможность регулирования параметров) или двойных водо- и воздухоподводящих трубных систем (дополнительный расход воздуха);
- испарительное или пленочное увлажнение поверхностей водой в специальных охлаждающих устройствах (максимальная относительная влажность 65-80 %);
- прохождение воздушного потока через емкости со льдом.

Непрямое охлаждение подаваемого воздуха с использованием теплообменника производится с помощью абсорбционных, адсорбционных и компрессионных холодильных установок.

Холодильные установки являются дорогостоящим оборудованием, их обслуживание требует значительных затрат. Для работы таких установок необходимо немалое количество электроэнергии. Механическая энергия, конвертированная в тепловую, и выделяемое потоком подаваемого воздуха тепло должны сбрасываться в атмосферу, что, в свою очередь, требует применения вторичных охладителей (которые также потребляют воду и электроэнергию).

Противообледенительная система

Риск обледенения воздушного фильтра или диффузора на входе в осевой компрессор возникает в регионах с холодным климатом в зимний период при высокой относительной влажности подаваемого воздуха. Это устраняется путем искусственного снижения влажности за счет предварительного подогрева воздуха. В данном случае применяется как

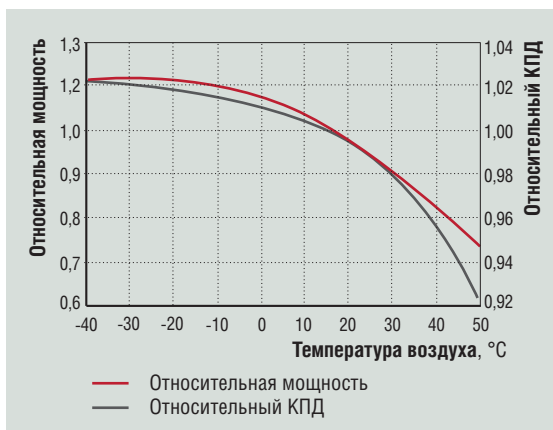


Рис. 1. Зависимость мощности и КПД газотурбинного двигателя от температуры окружающего воздуха

прямой, так и не прямой подогрев. Прямой подогрев подаваемого воздуха осуществляется путем смешивания его с отбираемым на выходе из компрессора теплым воздухом; охлаждающим воздухом укрытия ГТУ; выхлопными газами (значительно реже).

При непрямом предварительном подогреве применяется теплообменное оборудование и используется тепло, выделяемое из газового и парового цикла. Однако предварительный подогрев, как было отмечено ранее, снижает плотность подаваемого воздуха, а также мощность и КПД газовой турбины. Особенно в том случае, когда теплый воздух на выходе из компрессора используется в противообледенительной системе и уже больше не участвует в цикле для выработки энергии.

Вторичные системы охлаждения

Несмотря на высокую эффективность газовой турбины, при работе ГТУ выделяется сбросное тепло, отводимое во вторичных системах охлаждения. Это тепло, выделяемое генератором, тепло от охлаждения смазочного масла подшипников и любого зубчатого механизма и др.

В регионах с жарким климатом применение вторичных систем охлаждения часто создает проблемы при работе газовых турбин. В летний период не всегда удается поддерживать стабильную температуру масла, поэтому приходится снижать мощность двигателя, в крайних случаях – даже полностью останавливать его на некоторое время. Срок эксплуатации смазочного масла при этом снижается, в связи с чем возникает необходимость применения специальных смазочных средств.

Предварительный подогрев топлива

Предварительный подогрев топлива необходим для ГТУ, работающих на природном газе, чтобы компенсировать эффект Джоуля-Томсона при дросселировании сжатого газа, подаваемого из трубопровода в камеру сгорания. Температура газа также значительно снизится в результате процесса изохорности (в зависимости от коэффициента давления на регуляторе и температуры газа на выходе из трубопровода, а также от состава топливного газа). Существует опасность снижения температуры ниже отметки конденсации водяного пара и, соответственно, обледенения внутри и снаружи газоподводящего трубопровода.

Не менее опасно, если температура газа опускается ниже отметки конденсации углеводородов в природном газе. Известно, что пропан, бутан и другие высшие углеводороды, содержащиеся в природном газе, выделяются в жидком

состоянии при определенной температуре и давлении. Если данные компоненты в жидком состоянии попадут в двигатель и будут сгорать, то это может вызвать обратную вспышку и серьезные повреждения лопаток турбины. Поэтому одно из требований производителей газовых турбин к температуре газа на входе в камеру сгорания – она должна быть примерно на 15 К выше точки росы углеводородов и водяного пара на всех этапах эксплуатации.

Предварительный подогрев топливного газа производится на станциях редуцирования давления газа (ГРС), при этом расход топлива на его подогрев нельзя считать незначительным. Более того, на электростанциях топливный газ продолжают нагревать примерно до 200 °С непосредственно перед входом в двигатель. Предварительный подогрев производится за счет тепла, выделяемого в процессе работы ПГУ. В результате расход топливного газа в соответствии с тепловым эквивалентом снижается и пропорционально увеличивается КПД парогазовой системы.

Жидкие виды топлива также предварительно подогреваются, но, прежде всего, с целью повышения текучести.

Система гибридного кондиционирования

Для комплексной подготовки подаваемого в двигатель воздуха была разработана новая система (рис. 2), основными функциями которой являются:

- дополнительное охлаждение вторичных циклов (смазочного масла, генератора и т.д.);
- предварительный подогрев топлива;
- подготовка воздуха для горения;
- не прямой предварительный подогрев воздуха при температуре окружающей среды ниже 5 °С;

Рис. 2. Схема системы гибридного кондиционирования, применяемой в газовых турбинах

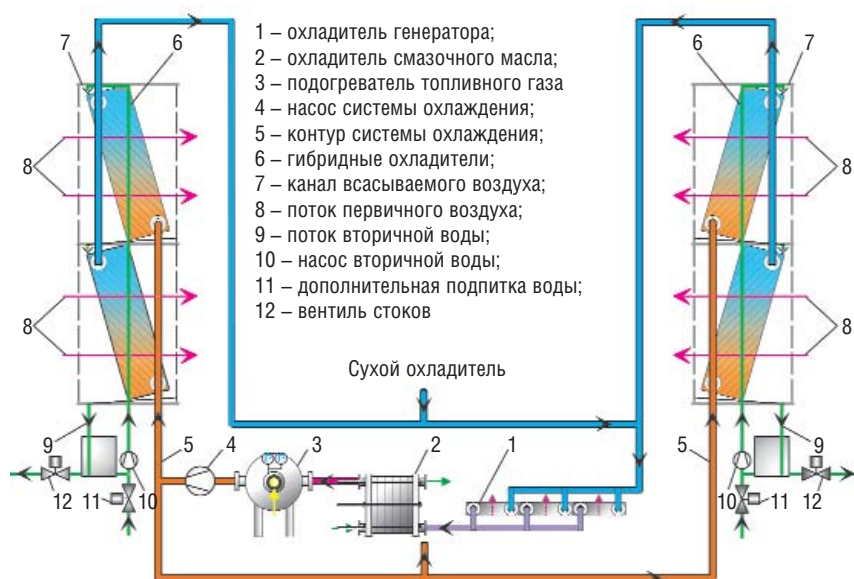
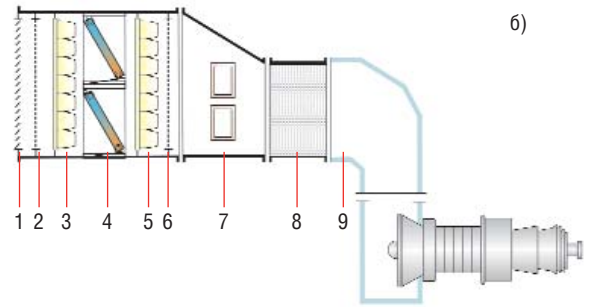
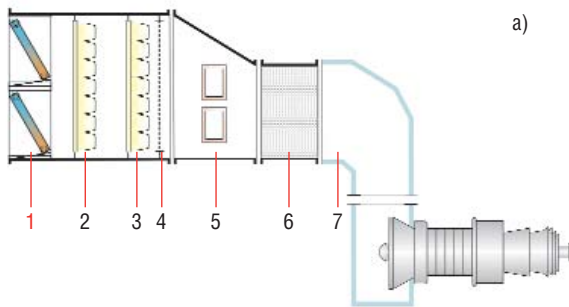


Рис. 3.

Варианты расположения элементов гибридных охлаждающих установок на входе в газовую турбину

- а)
 1 – блок гибридной охлаждающей установки;
 2 – фильтр предварительной очистки;
 3 – фильтр тонкой очистки;
 4 – распределительная решетка на входе воздуха;
 5 – адаптер;
 6 – глушитель шума;
 7 – впускной канал

- б)
 1 – защитная решетка;
 2 – решетка;
 3 – фильтр предварительной очистки;
 4 – блок гибридной охлаждающей установки;
 5 – фильтр тонкой очистки;
 6 – распределительная решетка на входе воздуха;
 7 – адаптер;
 8 – глушитель шума;
 9 – впускной канал



- увлажнение воздуха при высокой температуре окружающей среды;

- не прямой предварительный подогрев воздуха для работы двигателя с частичной нагрузкой.

С целью создания системы НСАС объединены в один контур источники тепла, выделяемого генератором, смазочным маслом и т.д., двухтрубный теплообменник подогрева топливного газа и гибридные теплообменные установки, расположенные в фильтрующих системах всасываемого воздуха. В качестве теплоносителя в закрытом вторичном контуре охлаждения используется водно-гликолевая смесь.

Гибридная охлаждающая установка

Гибридные установки используются в системах охлаждения. Они орошаются при температуре окружающего воздуха свыше 7...18 °С. Охлаждение осуществляется посредством теплообменников, выполненных из оребренных труб. Если температура окружающего воздуха выходит за допустимые пределы, то влажность воздуха повышается за счет образования водной пленки на всей поверхности блока.

Частичное испарение воды вызывает не прямое дополнительное охлаждение. Излишки воды собираются в отстойник, расположенный под охлаждающей установкой. После этого вода подается снова в систему увлажнения до момента достижения допустимой концентрации солей в воде. Затем осуществляется автоматическая продувка и дешламация. При увлажнении ребер теплообменника водой из окружающего воздуха смываются частицы пыли.

Циркуляция воды обеспечивается насосами, способными работать на различной частоте вращения. Гибридные охлаждающие установки отличаются экономичным потреблением воды и электроэнергии. Элементы таких установок также используются для кондиционирования воздуха для горения и устанавливаются непосредственно в потоке подаваемого воздуха в ГТУ.

Промывка воздуха водой уменьшает забивание воздушных фильтров частицами пыли, что продлевает срок службы элементов фильтров.

Гибридное теплообменное оборудование разработано с учетом допустимой дополнительной потери давления подаваемого воздуха (100 Па). Охлаждение производится при небольшой разнице между температурой воздуха и охлаждающей жидкостью. На входе в ГТУ достигается относительная влажность около 98 %. При этом образования капель не наблюдается. Повышение влажности возможно уже в том случае, если температура окружающего воздуха чуть выше 7 °С. Данная система является эффективной и легко регулируемой.

Ребра теплообменников производятся из прокатанного алюминия с электрофоретическим покрытием. Материал обладает высокой стойкостью к коррозии и имеет длительный срок службы.

Чтобы обеспечить надежность алюминиевых пластин, например в пустынях, где необходимо постоянно очищать подаваемый воздух от песка, элементы гибридной системы устанавливаются между ступенями фильтрации предварительной и тонкой очистки подаваемого воздуха в ГТУ (рис. 3, 4).

Атмосферные загрязнения смываются водой, подаваемой для увлажнения. Для удаления загрязняющих частиц из охлаждающей установки достаточно струи воды, в крайних случаях используется струя высокого давления (до 12 МПа) из форсунки.

Трубопроводы в системе охлаждения изготовлены из меди, толщина стенки – 0,75 мм.

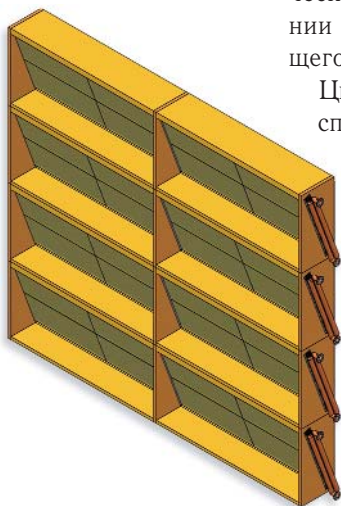
В гибридных системах охлаждения используется полностью деминерализованная вода. Удельная проводимость вторичного водяного контура является одним из основных критериев при контроле загрязнения гибридных систем. Дополнительно при необходимости может применяться биоцидное ингибирование, позволяющее избежать биологического «обрастания» во вторичном контуре.

Предварительный подогрев топлива

Предварительный подогрев топлива с использованием тепла, снимаемого с газовой турбины, оправдан в том случае, если температура

Рис. 4.

Блок гибридного охладителя, состоящего из 4 элементов



самого топлива достаточно низкая. Он используется при подаче природного газа из газопровода высокого давления, который значительно охлаждается в процессе подачи в камеру сгорания (как результат эффекта Джоуля-Томсона).

Если давление топливного газа ниже требуемого для работы газовой турбины, то необходимо его дополнительное сжатие. В результате температура газа повышается до таких показателей, что он уже не может применяться в процессе охлаждения.

Благодаря новому способу холодный топливный газ может использоваться для непрямого охлаждения подаваемого воздуха. В качестве еще одного источника снижения температуры может быть использована вода, пополняющая системы котла-утилизатора и охлаждения.

Применение двухтрубного теплообменника для предварительного подогрева газового топлива устраняет возможность попадания топлива в промежуточную систему охлаждения в случае утечки. Для контроля утечек используется аварийный сигнализатор. Двухтрубные теплообменники не требуют обслуживания и могут использоваться в течение длительного времени благодаря высокой надежности конструкции.

Преимущества системы НСАС

Гибридная система кондиционирования воздуха может использоваться для целого ряда процессов, включая дополнительное охлаждение вторичных циклов, предварительный подогрев топлива и подготовку воздуха для горения. Схема интеграции системы НСАС в ПГУ представлена на рис. 5. Нужно отметить следующие ее преимущества:

- применяется почти в любых природных условиях; исключается необходимость использования традиционных холодильных установок;
- обеспечивает эффективное дополнительное охлаждение генератора, смазочного масла и других источников сбросного тепла без использования энергии для работы вентиляторов и без дополнительного потребления воды;
- увеличиваются мощность и КПД газовой турбины в результате увлажнения подаваемого воздуха до коэффициента влажности ~ 98 % (таким образом, система может применяться в зонах с умеренным климатом, достигая наработки более 5000 часов в год). Использование полностью деминерализованной воды позволяет вырабатывать дополнительную электроэнергию;
- в результате использования противообледенительной системы с применением сбросно-



го тепла увеличиваются мощность и КПД газовой турбины;

- в результате непрямого предварительного подогрева воздуха с помощью сбросного тепла увеличиваются мощность и КПД парогазовой установки при работе с частичной нагрузкой;
- обеспечивается предварительная фильтрация воздуха, подаваемого в ГТУ (предварительное промывание продлевает срок службы элементов воздушного фильтра);
- сокращается площадь для размещения установки в связи с отсутствием вторичного охладителя во втором контуре охлаждения;
- снижается потребление топлива примерно на 0,1 % / 20 К благодаря предварительному подогреву. Отпадает необходимость в использовании традиционной котельной установки;
- топливный газ может использоваться для непрямого охлаждения подаваемого воздуха (природный газ низкой температуры является самым дешевым источником холода);
- снижается уровень эмиссии NO_x при увлажнении подаваемого воздуха.

Гибридная система подготовки воздуха для ГТУ

Результаты эксплуатации системы

Компания Energie und Wasser Potsdam GmbH (EWP) с 1996 г. эксплуатирует ПГУ-ТЭС «Юг» (вблизи г. Потсдама) на базе двух газотурбинных установок SGT-600 компании

Рис. 5. Интеграция системы НСАС в ПГУ

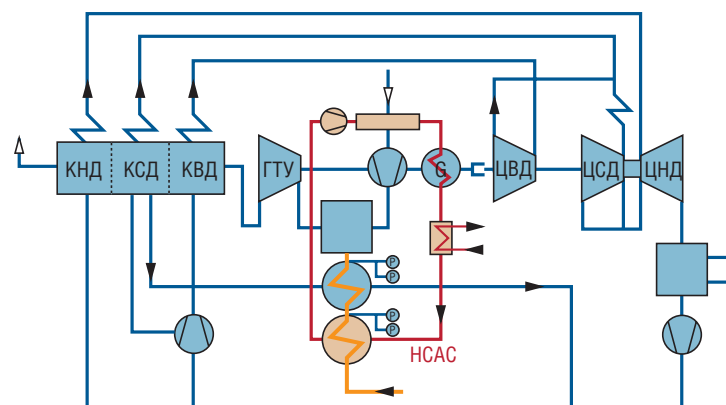




Рис. 6. Графики температуры и влажности атмосферного воздуха и воздуха после гибридной установки (НСАС) на примере ГТУ №1

Siemens. Для повышения качества фильтрации воздуха, защиты от обледенения и повышения мощности и КПД в 2007 году на ГТУ №1 была установлена гибридная система кондиционирования НСАС с трехступенчатой фильтрацией воздуха. Первый опыт эксплуатации был настолько убедительным, что уже через год такая же система была реализована на ГТУ №2.

На электростанции «Юг» газовые турбины не были оснащены системой антиобледенения. Именно обледенение и стало причиной того, что потребовалось дополнительно подмешивать отработавший воздух укрытия ГТУ к подаваемому воздуху. Но и эта временная мера не решала полностью проблемы.

В связи с этим в 2006 году компанией Thermo Integral проведены исследования для определения экономичности применения гибридной системы подготовки воздуха НСАС. При этом за основу были взяты следующие конкретные условия эксплуатации газотурбинной установки:

- предварительный нагрев топливного газа при помощи сбросного тепла смазочного масла;
- антиобледенение при помощи сбросного тепла свыше 300 часов в год;
- повышение мощности при помощи адиабатического увлажнения воздуха свыше 5200 часов в год в режиме базовой нагрузки;
- снижение мощности за счет предварительного подогрева воздуха более 780 часов в год.

Графики температуры и влажности атмосферного воздуха и воздуха после гибридной установки НСАС на примере ГТУ №1 представлены на рис. 6.

Антиобледенение

В холодное время года гибридные охладители работают как ребренные теплообменники для сухого воздуха. В теплое время, кроме того, они увлажняются водой. Благодаря этому охлаждаемый воздух при прохождении между ребрами охлаждающих элементов увлажняется. Деминерализованная вода при увлажнении поверхностей теплообменника испаряется – в результате адиабатного эффекта вода, протекающая в трубках системы охлаждения, охлаждается до значений, ниже температуры окружающего воздуха. В парогазовых установках гибридные охлаждающие элементы размещены непосредственно в потоке первичного воздуха КВОУ.

Для исключения обледенения гибридные элементы включаются в систему охлаждения электростанции параллельно двигателю. Таким образом, на них подается уже охлажденная водно-гликолевая смесь, которая только отдает остаточное тепло всасываемому воздуху. Поэтому в зимний период теплоноситель – антифриз, проходя через гибридные элементы, охлаждается от 20 °C до температуры ниже точки замерзания. Однако этого достаточно, чтобы обеспечить предварительный подогрев первичного воздуха при критических температурах воздуха перед газовой турбиной от –5 °C до +5 °C при относительной влажности >80 %.

После гибридных элементов теплоноситель системы охлаждения смешивается с теплоносителем, предварительно нагретым в двигателе, и подается на сухие охладители. Вентиляторы сухих охладителей, таким образом, могут работать на пониженных оборотах, или их количество может быть уменьшено.

Включение гибридных элементов в существующую систему охлаждения параллельно ГТУ позволяет оснащать ее системой НСАС без применения дополнительного циркуляционного насоса. Использование сбросного тепла для антиобледенения разгружает существующую систему охлаждения.

Регулирование мощности

В настоящее время все чаще выдвигается требование по обеспечению возможности работы ГТУ с пониженной мощностью. Для работы турбины на неполной нагрузке количество подаваемого воздуха снижается обычно за счет изменения положения лопаток на входе в компрессор. В результате увеличиваются потери давления в тракте всасывания и, соответственно, снижается КПД газовой турбины. Кроме того, снижение расхода воздуха отрицательно влияет на работу и характеристики

паротурбинного блока в комбинированном цикле.

Сегодня работу на неполной нагрузке можно обеспечить путем предварительного подогрева воздуха с помощью тепла, подводимого при помощи гибридного охладителя. Устранение потерь на дросселирование и использование сбросного тепла повышают КПД паросиловой части ТЭС на частичной нагрузке.

При использовании гибридных охладителей можно в теплый период (примерно с марта по ноябрь) эксплуатировать ГТУ с применением увлажнения подаваемого воздуха. Гибридные охладители позволяют получать относительную влажность воздуха перед двигателем почти на всех режимах около 98 % без образования аэрозолей или захватываемых воздухом капель воды.

Естественное охлаждение подаваемого воздуха стабилизирует мощность газовой турбины. Летом 2008 года в жаркие месяцы (июль и август) фиксировались значения температуры подаваемого воздуха перед ГТУ №1 намного ниже 20 °С при температуре наружного воздуха до 34 °С (рис. 6).

В результате применения гибридной системы кондиционирования первичного воздуха на SGT-600 повышается возможность регулирования мощности при высоком уровне КПД двигателя в широком диапазоне режимов эксплуатации (рис. 7, 8). Так, например, при температуре наружного воздуха +25 °С мощность двигателя можно регулировать в пределах 20,5...23,7 МВт.

Мощность установленного двигателя составляет 22,5 МВт. При необходимости ее можно снижать, благодаря предварительному подогреву воздуха и отсутствию потерь на дросселирование, примерно на 2 МВт (9,1 %). Или повышать – путем увлажнения воздуха, не работая на режиме пиковой нагрузки, примерно на 1,2 МВт (5,3 %). При увлажнении всасываемого воздуха КПД привода повышается при температуре 25 °С на 0,43 % в абсолютном значении. Для увлажнения воздуха требуется не более 1,6 т деминерализованной воды в час.

Полная замена традиционного КВОУ на гибридную систему кондиционирования и трехступенчатую фильтрацию первичного воздуха позволила:

- обеспечить надежную защиту от обледенения;
- снизить потери давления на всасывании несмотря на применение гибридных охладителей и трехступенчатой фильтрации воздуха;
- увеличить интервалы между промывками компрессора;

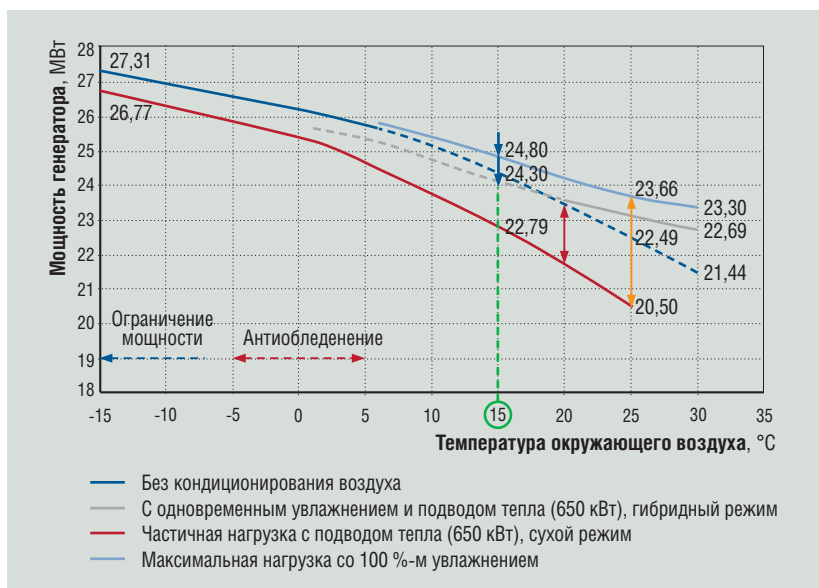
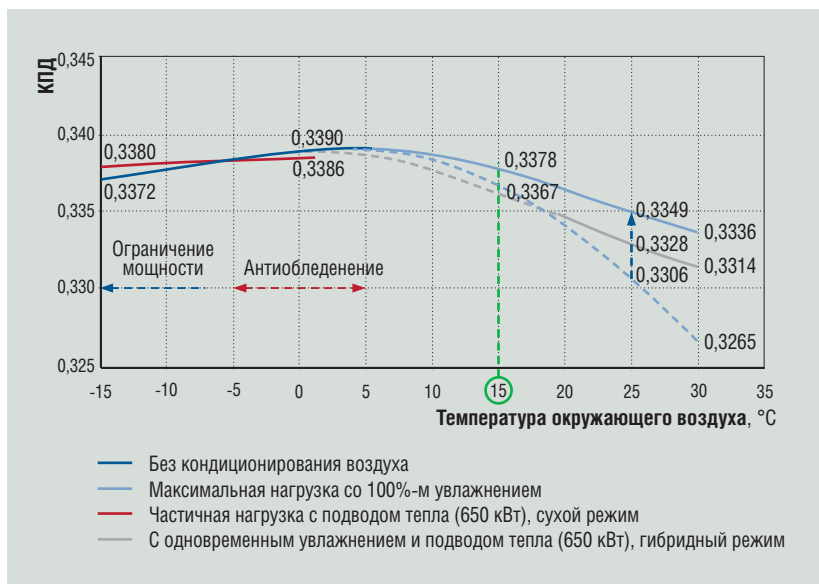


Рис. 7. Регулирование мощности при гибридном кондиционировании первичного воздуха при использовании сбросного тепла



- обеспечить охлаждение или подогрев воздуха на всасывании (т.е. обеспечить больший диапазон регулирования мощности).

Период окупаемости гибридной системы кондиционирования воздуха составляет около 2,5 лет. Применение НСАС при строительстве новых станций может обеспечить экономию средств при реализации проектов и затрат в процессе эксплуатации оборудования по сравнению с традиционными решениями.

Таким образом, новая система является важным решением в области разработки газовых турбин. Использование испытанных и отработанных стандартных элементов системы позволяет применять их почти в любых условиях эксплуатации. **Д**

Рис. 8. Изменение КПД при гибридном кондиционировании первичного воздуха с использованием сбросного тепла