

УДК 621.438

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГТД-110 ПРИ РАБОТЕ АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Рабенко В.С., доцент, канд. техн. наук, Будаков И.В., Белоусов П.П., инженеры

Представлены результаты натурных и численных исследований по совершенствованию режимов работы ПГУ-325. Предложены решения, направленные на повышение эффективности работы ПГУ-325 при пониженных температурах наружного воздуха.

Ключевые слова: газотурбинная установка, подготовка воздуха, антиобледенительная система, натурные исследования, охлаждение газовой турбины, энергосбережение, экономичность.

INCREASING OF GTE-110 EFFICIENCY IN CONDITION OF DEICING SYSTEM WORK

V.S.Rabenko, PhD in technical sciences (associate professor);
I.V. Budakov, Engineer; P.P. Belousov, Engineer

The presented results of full-scale and numerical studies on improvement of working CCU-325. The offered decisions directed on increasing of GTE-110 efficiency in condition of reduced outer air temperature.

Key words: gas-turbine unit, preparing of the air, deicing system, full-scale studies, cooling of the gas turbine, energy conservation, efficiency

Введение

Отечественные газотурбинные установки (ГТУ) проектируются по ГОСТ [1] на условия атмосферного воздуха: $p_{\text{атм}} = 101,3$ кПа и $t_{\text{нв}} = +15^\circ\text{C}$. Однако температура наружного воздуха в течение годового цикла эксплуатации изменяется в широких пределах (рис. 1).

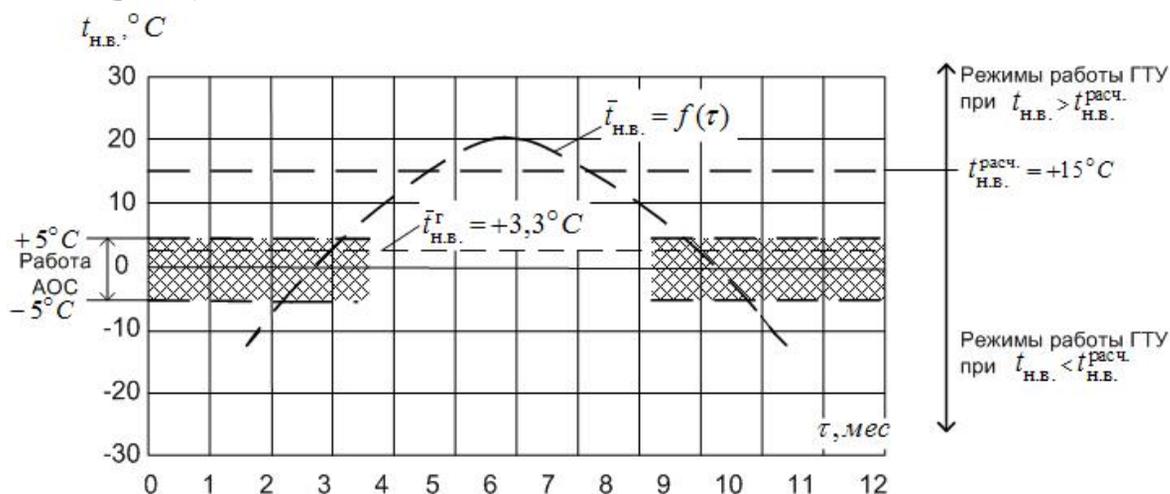


Рис.1. Режимы работы ГТУ в зависимости от температуры наружного воздуха

Например, среднегодовая температура воздуха в г. Комсомольске Ивановской обл., где установлены отечественные газотурбинные двигатели ГТД-110 (рис. 2) в составе парогазовой установки ПГУ-325 (Филиал «Ивановские ПГУ» ОАО «ИНТЕР РАО ЕЭС»), составляет $+3,3^{\circ}\text{C}$. Следовательно, эксплуатация газотурбинного двигателя (ГТД) осуществляется преимущественно в режимах ниже расчетных.

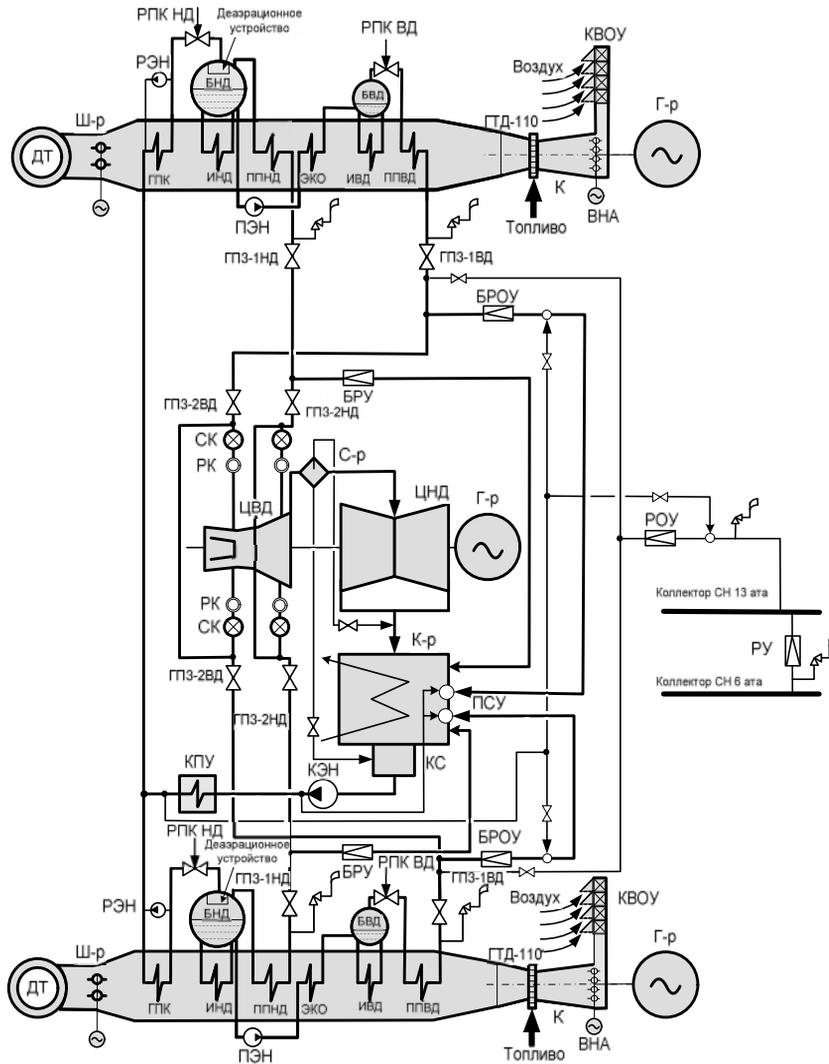


Рис. 2. Принципиальная схема ПГУ-325:

ВНА – входной направляющий аппарат; ГТД – газотурбинный двигатель; КВОУ – комплексное воздухоочистительное устройство; К – компрессор; КС – конденсатосборник; ГПЗ – главная паровая задвижка; С-р – сепаратор; Г-р – генератор. Контур высокого давления (ВД) КУ: ППВД – пароперегреватель ВД, ИВД – испаритель ВД; ПЭН – питательный электронасос. Контур низкого давления (НД) КУ: ППНД – пароперегреватель НД, ИИВД – испаритель НД, ГПК – газовый подогреватель конденсата; РЭН – рециркуляционный электронасос контура НД; РПК – регулятор питания котла; ДТ – дымовая труба; КЭН – конденсатный электронасос; К-р – конденсатор; ПСУ – паросбросное устройство; КПУ – конденсатор пара уплотнений паровой турбины (ПТ); РОУ – редуционно-охлаждающая установка контура НД КУ; БРУ – быстродействующая редуционно-охлаждающая установка контура ВД КУ; РУ – редуционная установка собственных нужд (СН); СК – стопорный клапан ПТ; РК – регулирующий клапан ПТ; ЦВД – цилиндр высокого давления ПТ; ЦНД – цилиндр низкого давления ПТ; Ш-р – шибер запорный; ДТ – дымовая труба, БРУ – быстродействующая редуционная установка; РУ – редуционная установка собственных нужд (СН)

Особенности работы ГТУ в составе ПГУ утилизационного типа

Температура наружного воздуха влияет на степень сжатия воздуха в компрессоре и степень понижения давления газов в газовой турбине (ГТ). Для ГТУ, работающей по открытому циклу, т.е. без котла-утилизатора (КУ), снижение температуры перед компрессором позволяет повысить ее мощность. Из характеристик компрессора ГТУ [2] следует, что КПД компрессора зависит от положения входного направляющего аппарата (ВНА) компрессора. Максимальному КПД компрессора ГТ соответствует полное открытие ВНА.

При работе ГТУ в составе ПГУ утилизационного типа [3], где одним из критериев является фиксированная температура газов за турбиной перед КУ, снижение температуры наружного воздуха приводит к необходимости прикрытия ВНА и, следовательно, снижению ее мощности (рис. 3).

Для турбин ГТД-110 филиала «Ивановские ПГУ» ОАО «ИНТЕР РАО ЕЭС» значение температуры газов за ГТ определено заводом-изготовителем (НПО «САТУРН») на уровне 517°C [4]. Контролируемая величина этой температуры определяется как среднее значение, рассчитываемое программно-техническим комплексом (ПТК) ГТУ по 20 датчикам, размещенным на выходе отработанных газов из ГТ. Количество точек измерения температуры соответствует количеству жаровых труб, расположенных в камере сгорания.

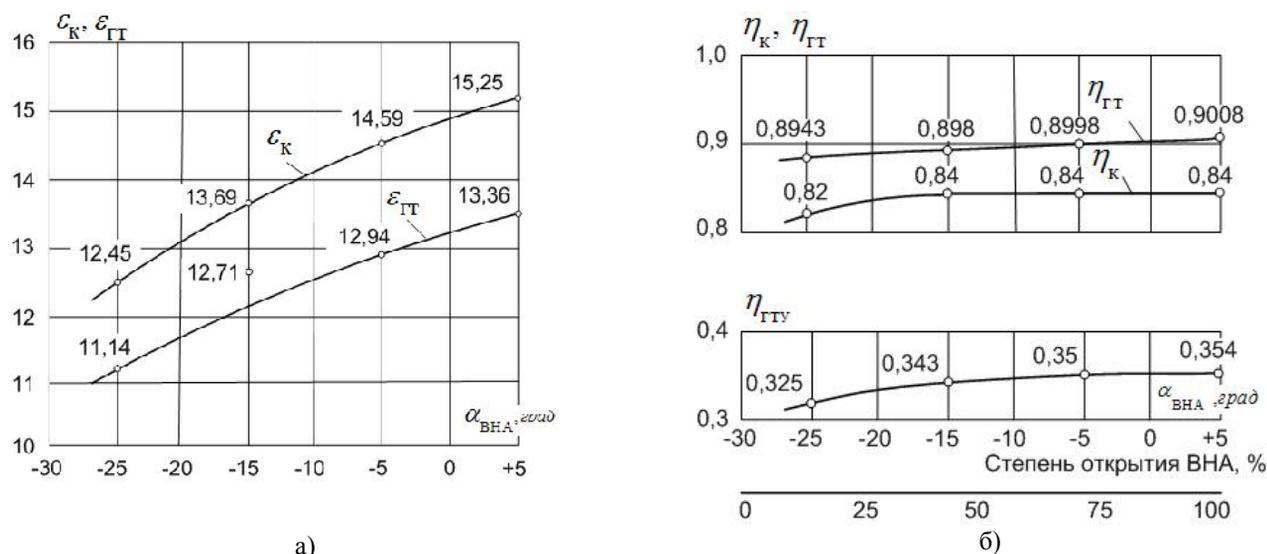


Рис.3. Влияние степени открытия ВНА на эффективность работы компрессора (а) и газовой турбины (б):

$\epsilon_{\text{к}}$ – степень сжатия воздуха в компрессоре; $\epsilon_{\text{ГТ}}$ – степень расширения газов в ГТ; $\eta_{\text{к}}$ – КПД компрессора; $\eta_{\text{ГТ}}$ – КПД ГТ; $\eta_{\text{ГТУ}}$ – КПД ГТУ

Поддержание контролируемого значения температуры газов за ГТ производится путем автоматического изменения положения ВНА, установленного перед первой ступенью компрессора. ВНА служит для управления расходом воздуха, необходимого для поддержания заданной температуры за ГТ [5]. Нагрузка ГТУ в диапазоне $100 \div 60\%$ от номинальной мощности и температура газов на выходе из ГТ (на входе в котел-утилизатор) регулируются путем изменения расхода воздуха через компрессор с помощью ВНА и расхода топлива регулирующим топливным клапаном (РКТ) при примерно постоянной температуре выхлопных газов ГТ. Этот диапазон нагрузок является наиболее экономичным, так как в нем незначительно изменяется КПД ГТУ.

В диапазоне нагрузок 0 ÷ 60% от номинальной нагрузка ГТУ изменяется только за счет изменения расхода топлива при полностью прикрытом ВНА. Температура выхлопных газов ГТ при этом прямо зависит от нагрузки, а расход газов изменяется на величину изменения расхода топлива.

Особенности работы ГТУ при низких температурах наружного воздуха

При отрицательных температурах и повышенной влажности наружного воздуха возможно обледенение входного тракта КВОУ (рис. 4 ÷ 6), защитной сетки и лопаток компрессора [5]. Опасность обледенения особенно велика, если при температуре окружающего воздуха от -5 °С до +5 °С имеются осадки в виде морозящего дождя, тумана или мокрого снега.

Верхний предел температуры наружного воздуха для включения антиобледенительной системы (АОС) связан с понижением температуры воздуха по воздухозаборному тракту. Так, при температуре наружного воздуха +5 °С и относительной влажности 80% температура воздуха перед первой ступенью компрессора по результатам расчетов составит +0,28 °С при влажности 100%, что свидетельствует о начале конденсации влаги на поверхностях. Дальнейшее снижение температуры без включения АОС приведет к образованию наледи на поверхностях КВОУ, которая в лучшем случае увеличит сопротивление по тракту. Образование наледи может привести и к возрастанию вибрации КВОУ.

Обледенение обычно сопровождается увеличением разрежения на входе в компрессор и снижением мощности ГТД. Для предупреждения обледенения входного тракта КВОУ (см. рис. 1) при температурах воздуха в диапазоне от -5°С до +5°С и относительной влажности 80 % система автоматического управления и регулирования мощности (САУиР) ГТЭ включает АОС.

При этом автоматически открывается антиобледенительный клапан АОС отбора горячего воздуха за 10-й ступенью компрессора на подогрев КВОУ (рис. 4). При температурах воздуха ниже -11 °С или выше +6 °С и относительной влажности менее 78 % АОС выключается из работы. При этом закрывается антиобледенительный клапан отбора горячего воздуха за 10-й ступенью компрессора на подогрев КВОУ. При температурах наружного воздуха ниже расчетных подогрев воздуха перед КВОУ увеличивает эффективность работы как ГТД, так и ПГУ в целом.

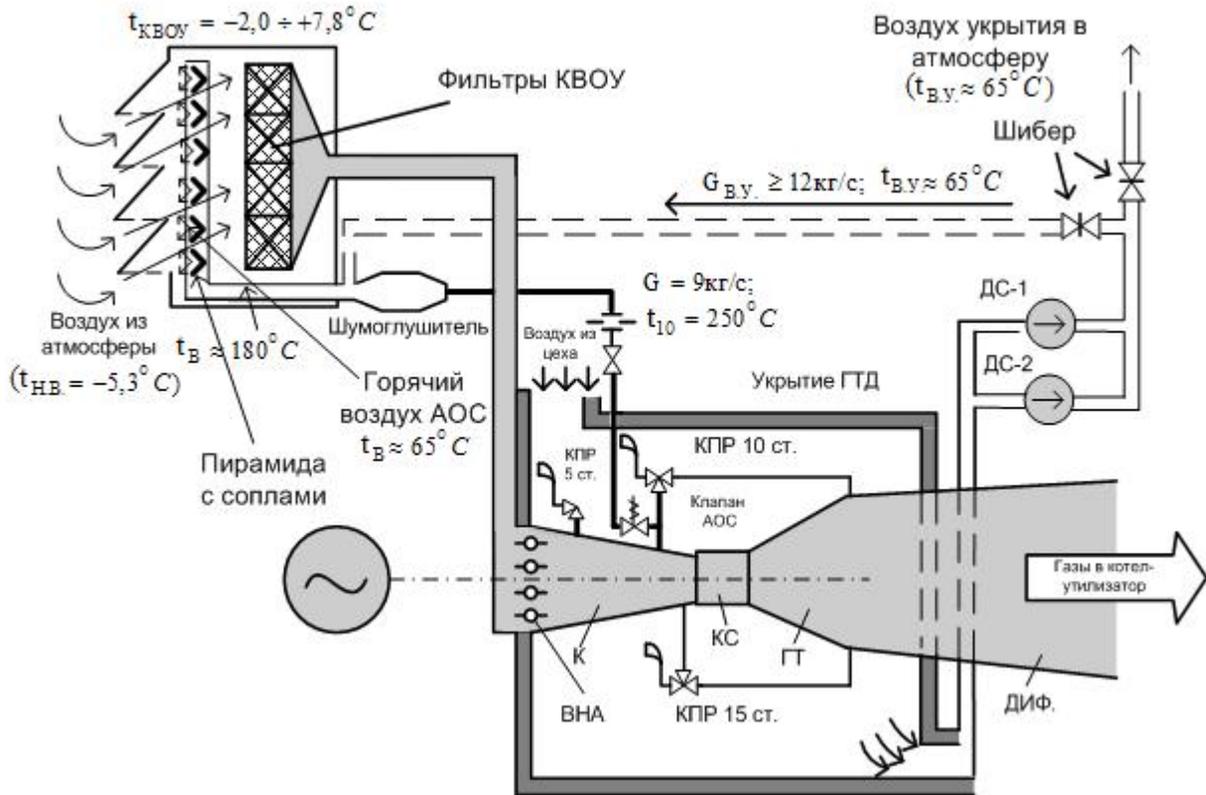


Рис. 4. Схема воздухозаборного тракта (ВЗТ) и теплового укрытия ГТЭ-110:

К – компрессор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; ДИФ. – диффузор соединения ГТ с котлом-утилизатором; КПР – клапан противопомпажной разгрузки; ст. – ступень компрессора (штриховой линией показано предлагаемое решение использования воздуха укрытия ГТД для работы АОС)

Неустойчивые режимы работы ступеней компрессора при постоянном числе оборотов могут возникнуть при снижении расхода воздуха [2]. В этом случае наиболее вероятно возникновение помпажа в последних ступенях компрессора и, как следствие, возможно повышение вибрации подшипника компрессора. Такое явление происходит, когда степень повышения давления увеличивается за счет снижения температуры воздуха на входе в компрессор.

Поэтому, при низких температурах воздуха, когда АОС отключается САУиР ГТЭ, её приходится переводить из автоматического управления в ручное и включать в работу. Безусловно, такая вынужденная мера включения АОС в работу приводит к перерасходу топлива. Здесь следует отметить, что при температуре ниже -5°C , по данным ЦКТИ, влага, содержащаяся в воздухе, не кристаллизуется на поверхностях фильтров КВОУ и обледенения не происходит. Отключение АОС при температуре ниже -10°C , а не ниже -5°C предполагает некоторый температурный запас до границы возникновения условий обледенения поверхностей КВОУ.

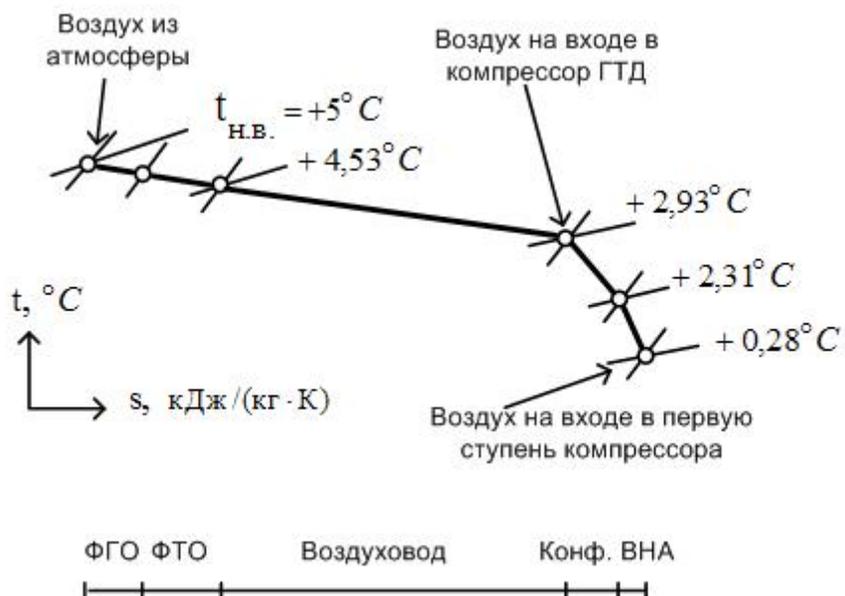


Рис. 5. Процессы в t,s -диаграмме изменения состояния воздуха от входа из атмосферы до входа в первую ступень компрессора при работе АОС:

ФГО, ФТО – фильтры грубой и тонкой очистки воздуха; Конф. – конфузор; ВНА – входной направляющий аппарат



Рис. 6. Вид на унифицированные прямоугольные модули КВОУ для ГТЭ-110 ОАО «Ивановские ПГУ»

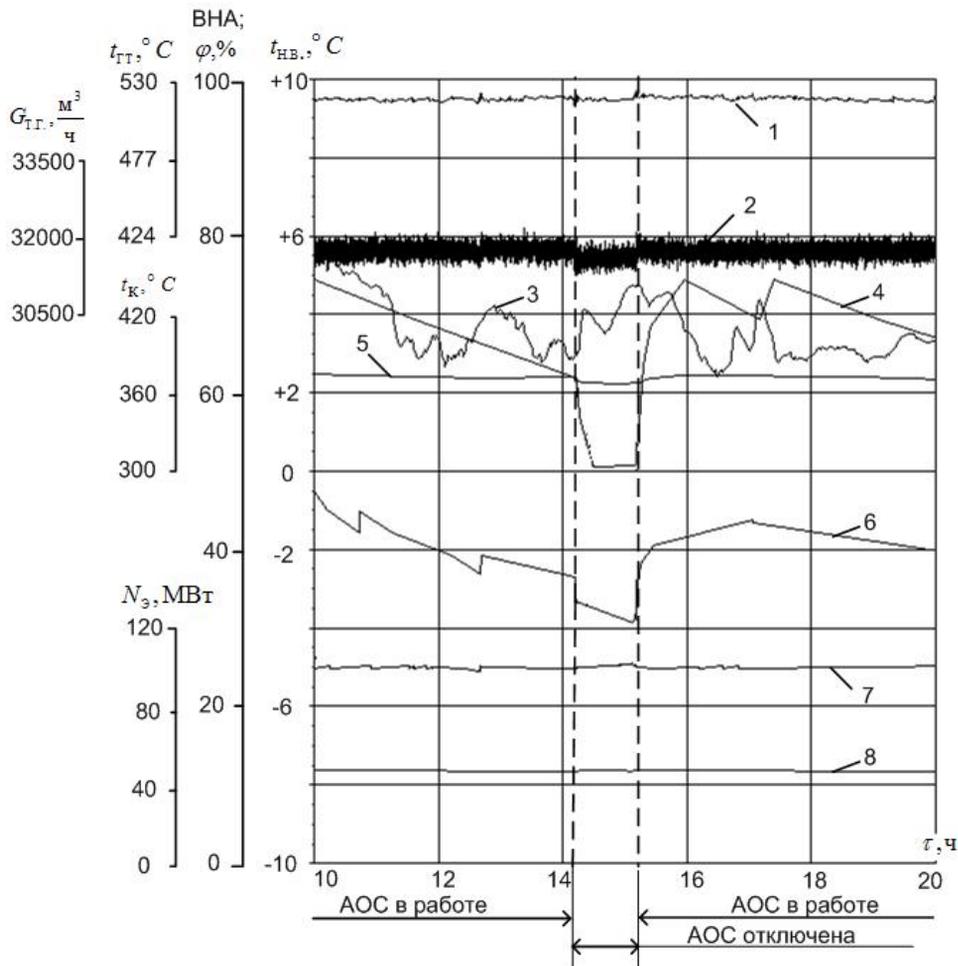
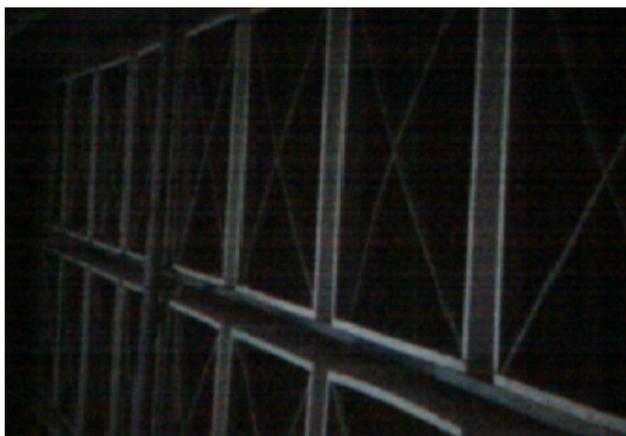


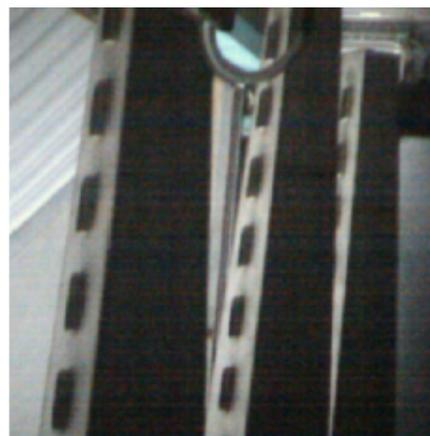
Рис. 7. Изменение основных характеристик ГТД-110 при работе с включенной и отключенной АОС:

1 – температура газов за турбиной; 2 – расход топливного газа; 3 – относительная влажность воздуха; 4 – температура наружного воздуха; 5 – температура воздуха за компрессором; 6 – положение ВНА (степень открытия); 7, 8 – электрическая мощность на клеммах генераторов ГТУ и паротурбинной установки, соответственно

Принцип работы АОС заключается в подогреве поступающего в компрессор холодного атмосферного воздуха горячим воздухом, отбираемым после 10-й ступени компрессора и поступающим на раздающие сопла, расположенные непосредственно перед фильтрами КВОУ (рис. 8, 9).



а)



б)

Рис. 8. Вид на фильтры КВОУ (а) и на раздающие сопла горячего воздуха (б), поступающего из 10-й ступени компрессора

Расход отбираемого воздуха на АОС после 10-ой ступени компрессора для подогрева наружного воздуха перед фильтрами КВОУ, по проектным данным, составляет $G_{АОС} = 9 \text{ кг/с}$, с температурой $\approx 300 \text{ }^\circ\text{C}$. [4]. По тракту от компрессора до раздающего воздушного коллектора КВОУ температура воздуха снижается до $\approx 200 \text{ }^\circ\text{C}$; после установок шумоглушения до $\approx 185 \text{ }^\circ\text{C}$; в соплах перед фильтрами до $\approx 70 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 9).

Величину тепловых потерь транспорта воздуха АОС можно оценить следующим образом:

$$Q_{АОС} = G_{10} (c_{p\epsilon 10} t_{2\epsilon 10} - c_{p\epsilon}^{АОС} t_{\epsilon}^{АОС}) = 2163,5 \text{ кДж/с.}$$

Здесь $G_{10} = 9 \text{ кг/с}$ ($W^{АОС} = (G_{10} / \rho_{cp}^{АОС}) \cdot 3600 \approx 26200 \text{ м}^3/\text{час}$) – расход воздуха на АОС после 10-й ступени компрессора; $t_{2\epsilon 10} = 295 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура воздуха после 10-ой ступени компрессора при $t_{н.в.} = +5 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\epsilon}^{АОС} = 67 \text{ }^\circ\text{C}$ – средняя температура горячего воздуха АОС перед фильтрами КВОУ; $c_{p\epsilon 10} = 1,0435 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ – изобарная теплоемкость воздуха после 10-й ступени компрессора; $c_{p\epsilon}^{АОС} = 1,0066 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ – изобарная теплоемкость воздуха АОС перед фильтрами КВОУ.

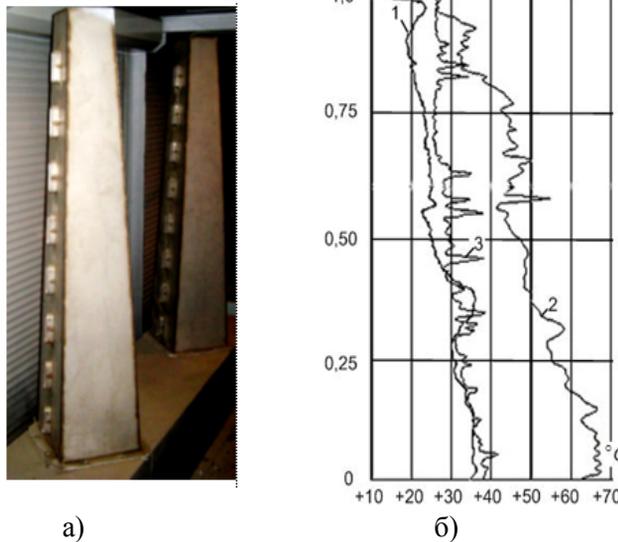


Рис. 9. Пирамида с соплами распределения горячего воздуха на входе КВОУ (а) и изменение температуры по высоте сопел при включенной АОС (б):
1 - минимальная; 2 - максимальная; 3 - средняя

Если пренебречь потерями при транспортировке горячего воздуха до входа в фильтры КВОУ, то из теплового баланса

$$G_{КВОУ} c_{p\epsilon}^{КВОУ} \cdot t_{\epsilon}^{КВОУ} = G_{н.в.} \cdot c_{pн.в.} \cdot t_{н.в.} + G_{10} \cdot c_{p\epsilon}^{АОС} \cdot t_{\epsilon}^{АОС}$$

можно оценить величину нагрева воздуха при включении АОС:

$$\Delta t_{\epsilon}^{КВОУ} = t_{\epsilon}^{КВОУ} - t_{н.в.} = (G_{н.в.} \cdot c_{pн.в.} \cdot t_{н.в.} + G_{10} \cdot c_{p\epsilon}^{АОС} \cdot t_{\epsilon}^{АОС}) / (G_{КВОУ} c_{p\epsilon}^{КВОУ}) - t_{н.в.}$$

Здесь $G_{КВОУ}$ – суммарный расход воздуха через КВОУ, кг/с ; $G_{н.в.}$ – расход наружного воздуха через КВОУ, кг/с ; G_{10} – расход воздуха АОС, кг/с ; $c_{p\epsilon}^{КВОУ}$ – изобарная

теплоемкость подогретого воздуха АОС, $\kappaДж/(кг\cdot K)$; $c_{p\text{ н.в.}}$ – изобарная теплоемкость наружного воздуха перед КВОУ, $\kappaДж/(кг\cdot K)$; $c_{p\text{ в.}}^{АОС}$ – изобарная теплоемкость воздуха АОС перед фильтрами КВОУ, $\kappaДж/(кг\cdot K)$; $t_{\text{в}}^{КВОУ}$ – температура подогретого воздуха, $^{\circ}C$; $t_{\text{н.в.}}$ – температура наружного воздуха перед КВОУ, $^{\circ}C$; $t_{\text{в}}^{АОС}$ – температура воздуха АОС перед КВОУ, $^{\circ}C$.

Результаты расчета сведены в таблицу.

Таблица. Эффективность работы АОС ГТЭ-110

Величина	Температура наружного воздуха, $^{\circ}C$				Примечание
	+5	0	-5	-10	
Давление атмосферного воздуха, кПа	101,3				Принято
Относительная влажность атмосферного воздуха, %	80	80	80	80	Дополнительное условие включения АОС при $-5^{\circ}C \leq t_{\text{н.в.}} \leq +5^{\circ}C$
Электрическая нагрузка ГТЭ, МВт	110	110	110	110	Принято
Расход воздуха АОС, кг/с	9	9	9	9	Принято по данным ЦКТИ
Температура горячего воздуха после 10-ой ступени компрессора, $^{\circ}C$	295	287	286	280	Расчет [6]
Температура горячего воздуха перед фильтрами КВОУ, $^{\circ}C$	67	64	63	60	Данные натурных испытаний. Температура воздуха принята равной температуре поверхности металла сопел подачи горячего воздуха АОС КВОУ
Величина нагрева воздуха при включении АОС, $^{\circ}C$	1	1	1	2,6	Расчет [6]
Температура подогретого воздуха перед фильтрами КВОУ, $^{\circ}C$	+6	+1	-4	-7,4	Расчет [6]

Анализ полученных результатов показывает, что подача горячего воздуха непосредственно на вход фильтров КВОУ приводит к незначительному увеличению температуры воздуха перед КВОУ.

Для проверки работоспособности АОС при низких температурах наружного воздуха ($-10^{\circ}C < t_{\text{н.в.}} < +5^{\circ}C$) был выполнен термографический контроль (25.02.2009 г.) с помощью тепловизора (рис. 10).

Условия проведения исследований: $t_{\text{н.в.}} = -5,3^{\circ}C$; $p_{\text{атм}} = 747\text{ мм рт.ст.}$; $\varphi_{\text{атм}} = 63,1\%$; $N_{\text{эл}}^{\text{ГТУ}} = 97,2\text{ МВт}$.

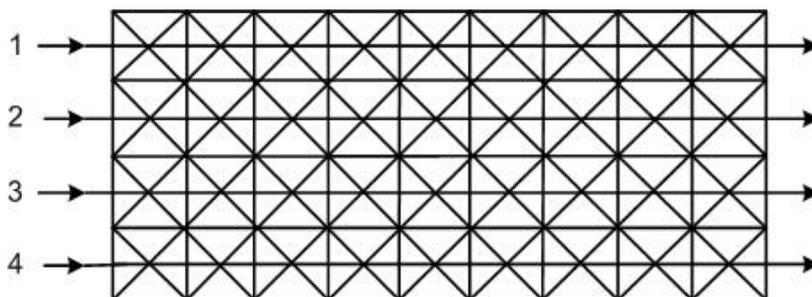


Рис. 10. Схема термографического контроля поверхностей фильтров КВОУ: 1 ÷ 4 – линии трассирования поверхностей фильтров тепловизором

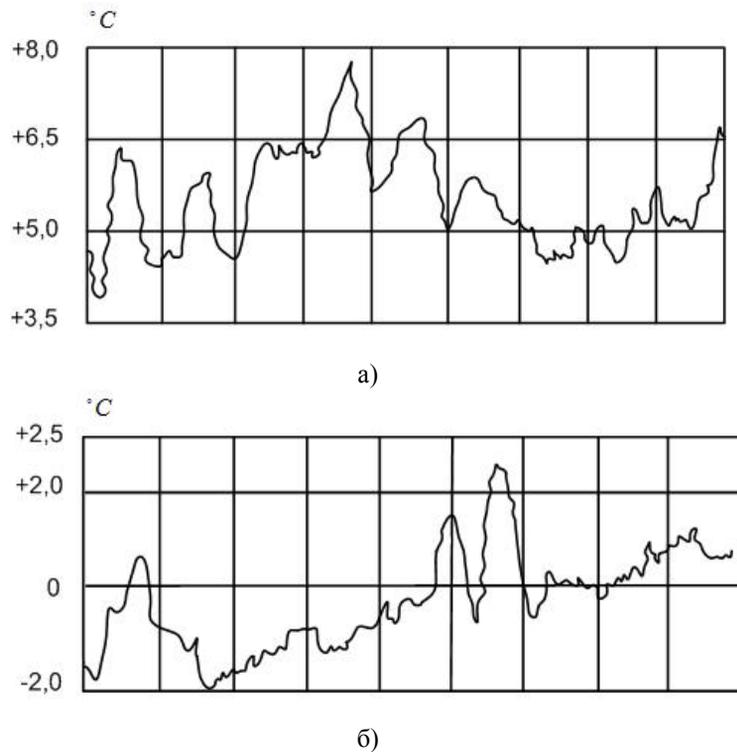


Рис. 11. Значения температур на поверхностях фильтров КВОУ по результатам испытаний при температуре наружного воздуха $t_{н.в.} = -5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и включенной АОС:
 а – максимальные; б - минимальные

Результаты проведенных натурных исследований и расчетов свидетельствуют, что при включении АОС непосредственно перед фильтрами КВОУ температура воздуха изменяется в среднем от $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 12).



Рис. 12. Режимная характеристика АОС при относительной влажности наружного воздуха $\varphi = 80\%$ по результатам расчетов [6]:
 1 – АОС отключена; 2 – АОС включена; точки: а – температура наружного воздуха перед фильтрами КВОУ; б – температура перед первой ступенью компрессора при отключенной АОС; с – то же, но при включенной АОС

При включении АОС снижается расход воздуха компрессора в камеру сгорания ГТ (см. рис. 7). При работе по диспетчерскому графику для поддержания неизменной мощности на клеммах генератора ГТУ (в примере расчета (см. табл.) принято, что $N_{эл}^{ГТУ} = 100 \text{ МВт}$) одновременно САУиР ГТЭ увеличивается расход топливного газа в камеру сгорания на величину $\Delta G_{ПГ} \approx 150 \div 200 \text{ м}^3/\text{ч} = 301 \div 402 \text{ г/с}$ (плотность топливного (природного) газа принята $\rho_{ng} = 0,7231 \text{ кг/м}^3$).

О возможностях утилизации тепла воздуха укрытия ГТД-110

Турбина ГТД-110 производства НПО «Сатурн» конструктивно выполнена без тепловой изоляции [4]. Вместо нее выполнено укрытие, представляющее собой металлический короб с четырьмя дверями для входа обслуживающего персонала.

Поверхности ГТ и компрессора охлаждаются организованным потоком воздуха, поступающим из цеха через верхнюю часть укрытия. Вентиляция выполнена приточно-вытяжной. Холодный воздух в укрытие поступает из помещения главного корпуса.

Воздух в помещение теплового укрытия забирается из помещения главного корпуса. В зимнее время температура в помещении главного корпуса составляет $\approx +20 \div +30 \text{ }^\circ\text{C}$ при открытых окнах (фрамугах). Горячий воздух из укрытия удаляется дымососом в атмосферу. Производительность дымососа составляет около $100\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Температура нагретого воздуха на выходе из укрытия в данных условиях достигает $\approx +65 \text{ }^\circ\text{C}$.

Такая конструкция теплового укрытия ГТ и компрессора имеет как положительные, так и отрицательные стороны. Положительной стороной является мобильность сборки и разборки конструкции ГТУ и возможность транспортировки в собранном виде компрессора и ГТ.

Недостатком данного конструктивного решения теплового укрытия являются тепловые потери низкопотенциального рабочего тела (нагретый воздух укрытия) в окружающую среду с поверхностей корпусов компрессора и ГТ.

Величину тепловых потерь с воздухом укрытия в окружающую среду можно оценить следующим образом:

$$Q_{VKP} = (W^{VKP} \rho_{cp} / 3600) \cdot (c_{p26} t_{26}^{VKP} - c_{p16} t_{16}^{VKP}) = 1340 \text{ кДж/с.}$$

Здесь $W^{VKP} = 100\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ – объемный расход воздуха через укрытие; $\rho_{cp} = (\rho_{p26} - \rho_{p16})/2 = 1,12137 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха в укрытии; $t_{16}^{VKP} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура воздуха на входе в укрытие; $t_{26}^{VKP} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура воздуха на выходе из укрытия; $c_{p16} = 1,0035 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ – изобарная теплоемкость воздуха на входе в укрытие; $c_{p26} = 1,00639 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ – изобарная теплоемкость воздуха на выходе из укрытия.

Учитывая, что включение в работу АОС с отбором воздуха компрессора приводит к некоторому снижению экономичности ГТУ и ПГУ в целом, в целях энергосбережения и повышения эффективности работы ПГУ можно использовать для работы АОС воздух укрытия ГТУ (см. рис. 4). Для этого предлагается подавать горячий воздух из укрытия ГТД непосредственно на вход фильтров КВОУ. Увеличение температуры наружного воздуха перед КВОУ (на $5 \div 7 \text{ }^\circ\text{C}$) приведет к росту температуры воздуха за компрессором, увеличению температуры отработанных газов за ГТ и, как следствие, открытию ВНА для поддержания температуры за ГТ.

Кроме того, для более эффективного охлаждения поверхности ГТД, учитывая существование внутри теплового укрытия зон с минимальным отводом тепла от поверхности двигателя, по данным исследований [7], предлагается использовать

разрежение перед ВНА ($\Delta H \approx 200 \div 300$ мм вод. ст.) для направления потока нагретого воздуха внутри теплового укрытия в застойную зону воздуха (рис. 13,б).

Таким образом, поток воздуха, поступающий в укрытие, не только равномерно распределится внутри укрытия, но и повысит температуру перед компрессором, уменьшит разрежение перед ВНА, что позволит также уменьшить сопротивление воздухозаборного тракта от КВОУ до первой ступени компрессора.

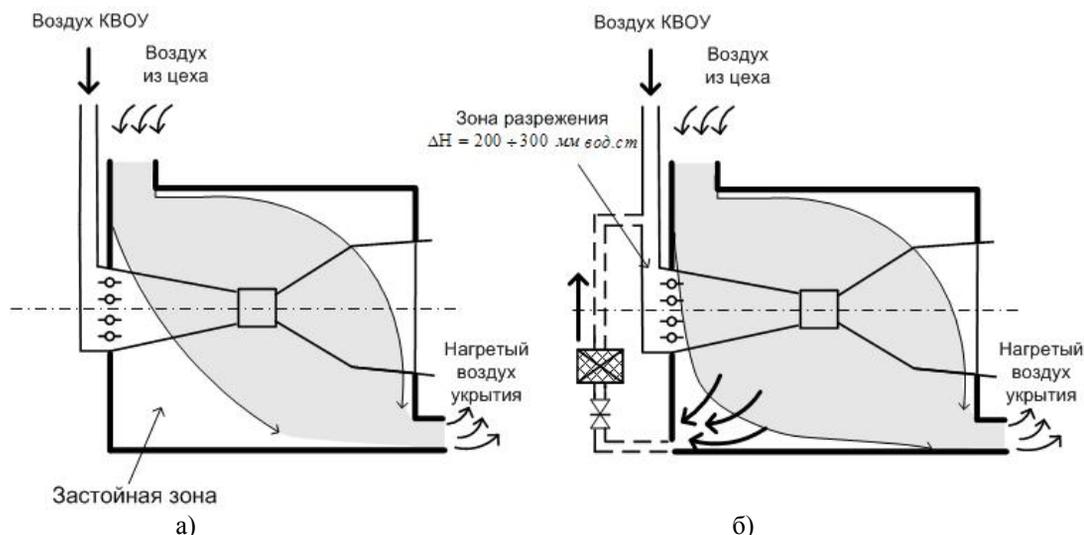


Рис. 13. Принципиальная схема охлаждения ГТД в тепловом укрытии:
а – существующее решение; б – предлагаемое решение

В итоге, от дополнительного расхода подогретого воздуха, пропускаемого ВНА, произойдет увеличение степени сжатия, производительности и КПД компрессора, увеличение температуры газов за ГТ, а также мощности ГТ, вследствие повышения расхода рабочего тела и срабатываемого теплоперепада в проточной части ГТ. Это потребует для поддержания температуры газов перед КУ, прежде всего, уменьшения расхода топлива.

Заключение

Использование нагретого воздуха теплового укрытия ГТД для работы АОС позволяет уменьшить затраты работы на привод компрессора газовой турбиной и тем самым уменьшить удельный расход топлива на ПГУ.

Отбор части воздуха теплового укрытия ГТД с подачей его в зону разрежения на вход компрессора позволяет повысить эффективность охлаждения корпуса ГТД и снизить сопротивление воздухозаборного тракта от КВОУ до первой ступени компрессора.

Литература

1. ГОСТ Р 52200-2004 (ИСО 3977-2:1997). Установки газотурбинные. Нормальные условия и номинальные показатели.
2. Стационарные газотурбинные установки: Справочник / Л.В.Арсеньев, В.Г.Тырышкин, И.А.Богови др. – Ленинград «Машиностроение» Ленингр. отд-е. – 1989.
3. Карачев А.И., Будаков И.В., Рабенко В.С. О некоторых итогах эксплуатации современных отечественных ПГУ // Электронный журнал ОАО РАО «ЕЭС России». – «Новое в российской электроэнергетике». №12. – 2007. – С. 6–16.
4. Газотурбинная энергетическая установка ГТЭ-110 для ПГУ-325. Руководство по эксплуатации. Ч. 1. Описание и работа (097108000 РЭ). – НПК «Зоря»-«Машпроект», – 2004.
5. Газотурбинная энергетическая установка ГТЭ-110 для ПГУ-325. Руководство по эксплуатации. Ч. 2 Описание и работа (097108000 РЭ). – НПК «Зоря»-«Машпроект», – 2004.
6. Рабенко В.С., Будаков И.В., Алексеев М.А. Тепловой расчет двухконтурной парогазовой установки утилизационного типа: Учеб. пособие/ Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2008.
7. Газотурбинная установка ГТГ-110. Результаты термометрического исследования укрытия ГТД-110 в составе блока №1 ПГУ-325 ОАО «Ивановские ПГУ». – ВТИ, – 2008.