

УДК 621.438

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ БИНАРНОЙ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА

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

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

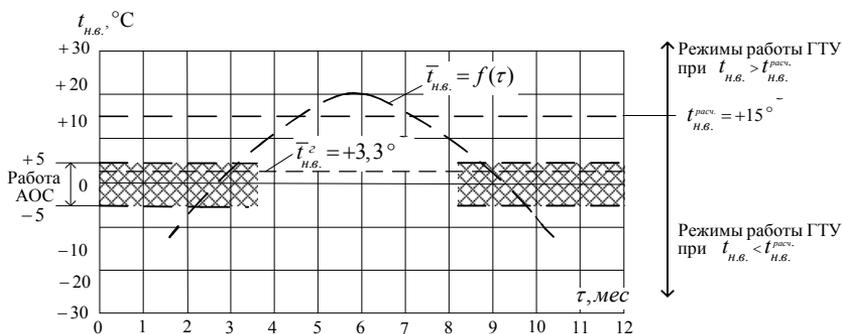


Рис. 1. Режимы работы ГТУ в зависимости от температуры наружного воздуха

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 °С. Следовательно, эксплуатация газотурбинного двигателя (ГТД) осуществляется преимущественно в режимах ниже расчетных.

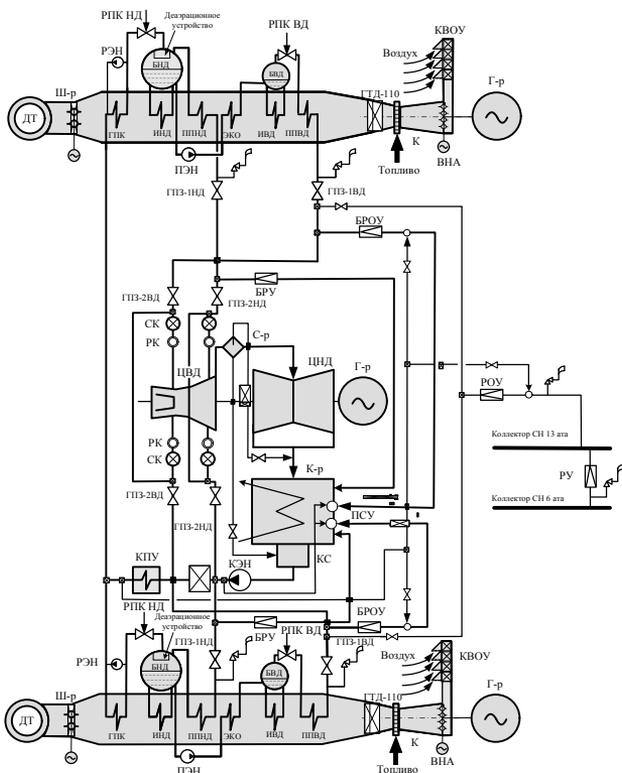


Рис. 2. Принципиальная схема ПГУ-325:

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, ИНД – 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 – редукционно-охладительная установка контура ВД КУ; БРОУ – быстродействующая редукционно-охладительная установка контура ВД КУ; РУ – редукционная 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 редукционная установка; РУ – редукционная 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 °С [4]. Контролируемая величина этой температуры определяется как среднее значение, рассчитываемое программно-техническим комплексом ГТУ по 20 датчикам, размещенным на выходе отработанных газов из ГТ. Количество точек измерения температуры соответствует количеству жаровых труб, расположенных в камере сгорания.

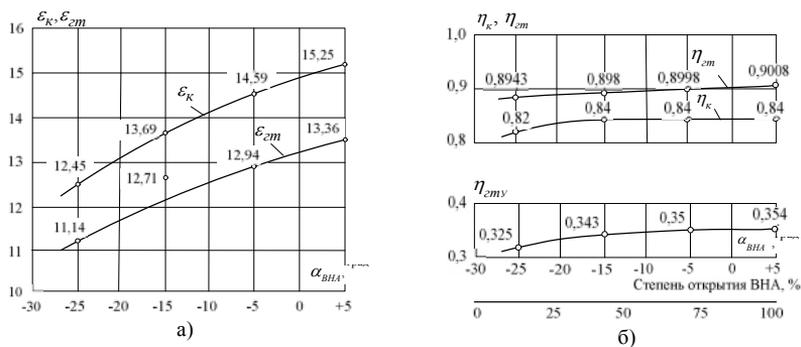


Рис. 3. Влияние степени открытия ВНА на эффективность работы компрессора (а) и газовой турбины (б): ϵ_k – степень сжатия воздуха в компрессоре; $\epsilon_{гт}$ – степень расширения газов в ГТ; η_k – КПД компрессора; $\eta_{гт}$ – КПД ГТ; $\eta_{гтв}$ – КПД ГТУ

Поддержание контролируемого значения температуры газов за ГТ производится путем автоматического изменения положения ВНА, уста-

новленного 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 $0 \div 60$ % 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 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 (рис. 5, 7). 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 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.

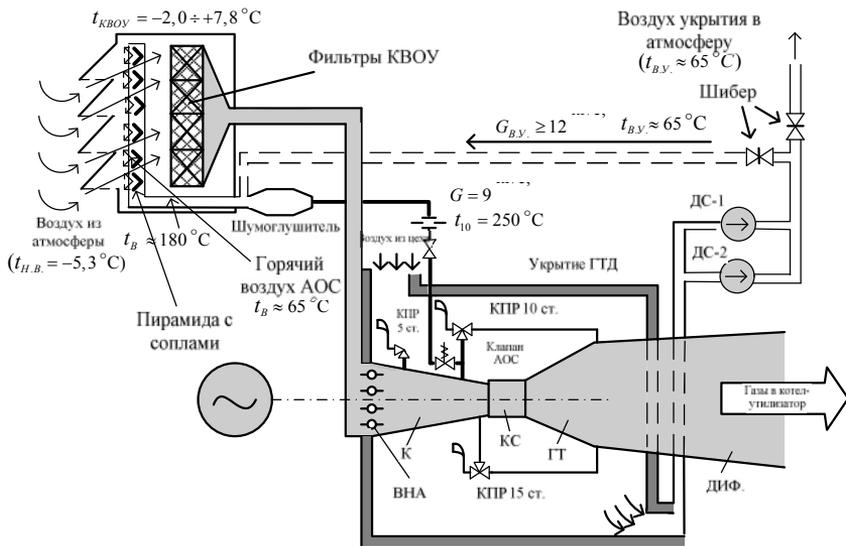


Рис. 4. Схема воздухозаборного тракта и теплового укрытия ГТЭ-110:
 К – компрессор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; ДИФ. – диффузор соединения ГТ с котлом-утилизатором; КПР – клапан противоположной разгрузки; ст. – ступень компрессора (штриховой линией показано предлагаемое решение использования 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 вклю-

чения АОС в работу приводит к перерасходу топлива. Здесь следует отметить, что при температуре ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, по данным ЦКТИ, влага, содержащаяся в воздухе, не кристаллизуется на поверхностях фильтров КВОУ и обледенения не происходит. Отключение АОС при температуре ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, а не ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ предполагает некоторый температурный запас до границы возникновения условий обледенения поверхностей КВОУ (рис. 6).

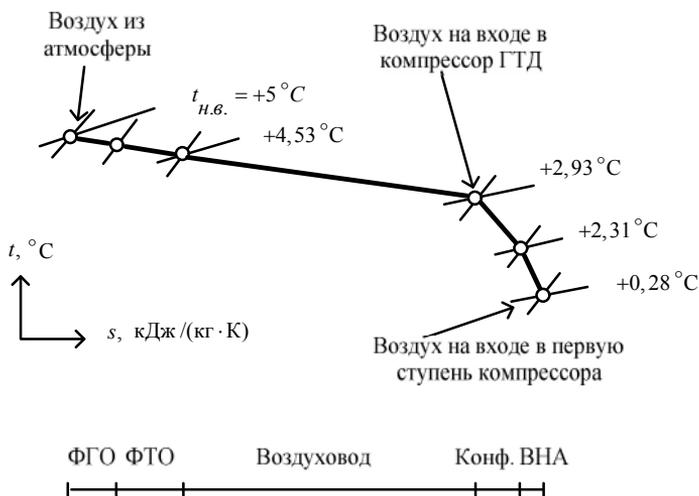


Рис. 5. Процессы в t,s -диаграмме изменения состояния воздуха от входа из атмосферы до входа в первую ступень компрессора при работе АОС:
 ФГО, ФТО – фильтры грубой и тонкой очистки воздуха;
 Конф. – конфузор; ВНА – входной направляющий аппарат



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

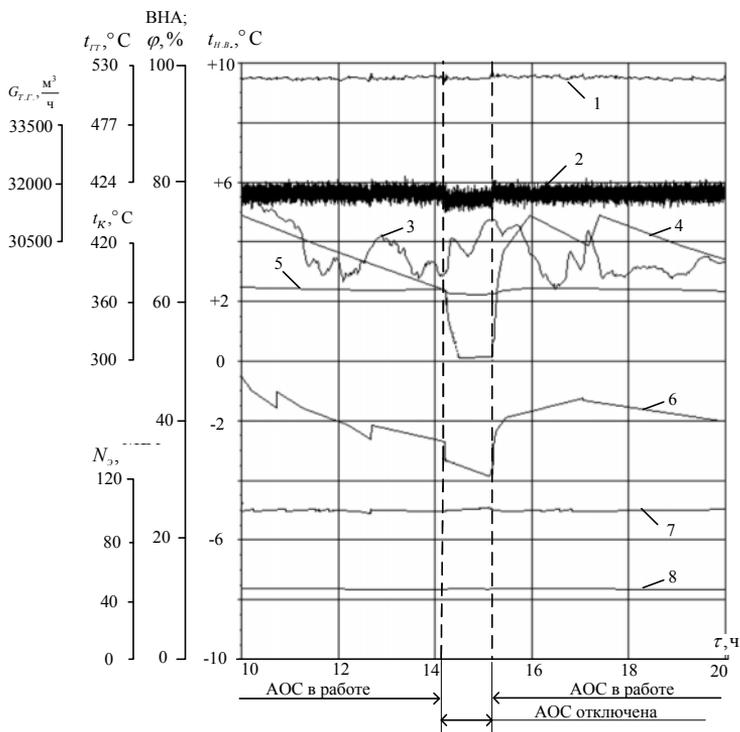


Рис. 7. Изменение основных характеристик ГТД-110 при работе с включенной и отключенной АОС: 1 – температура газов за турбиной; 2 – расход топливного газа; 3 – относительная влажность воздуха; 4 – температура наружного воздуха; 5 – температура воздуха за компрессором; 6 – положение ВНА (степень открытия); 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).



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 $G_{AOC} = 9$ кг/с, с температурой ≈ 300 °С [4]. По тракту от компрессора до раздающего воздушного коллектора КВОУ температура воздуха снижается до ≈ 200 °С; после установок шумоглушения до ≈ 185 °С; в соплах перед фильтрами до ≈ 70 °С (рис. 9).

Величину тепловых потерь транспорта воздуха АОС можно оценить следующим образом:

$$Q_{AOC} = G_{10} \cdot (c_{p.g.10} \cdot t_{2g10} - c_{p.g.}^{AOC} \cdot t_g^{AOC}) = 2163,5$$

Здесь $G_{10} = 9$ кг/с ($W^{AOC} = (G_{10} / \rho_{cp}^{AOC}) \cdot 3600 \approx 26200$ м³/час) – расход воздуха на АОС после 10-й ступени компрессора; $t_{2g10} = 295$ °С – температура воздуха после 10-ой ступени компрессора при $t_{н.г} = +5$ °С; $t_g^{AOC} = 67$ °С – средняя температура горячего воздуха АОС перед фильтрами КВОУ; $c_{p.g.10} = 1,0435$ кДж/(кг·К) – изобарная теплоемкость воздуха после 10-й ступени компрессора; $c_{p.g.}^{AOC} = 1,0066$ кДж/(кг·К) – изобарная теплоемкость воздуха АОС перед фильтрами КВОУ.

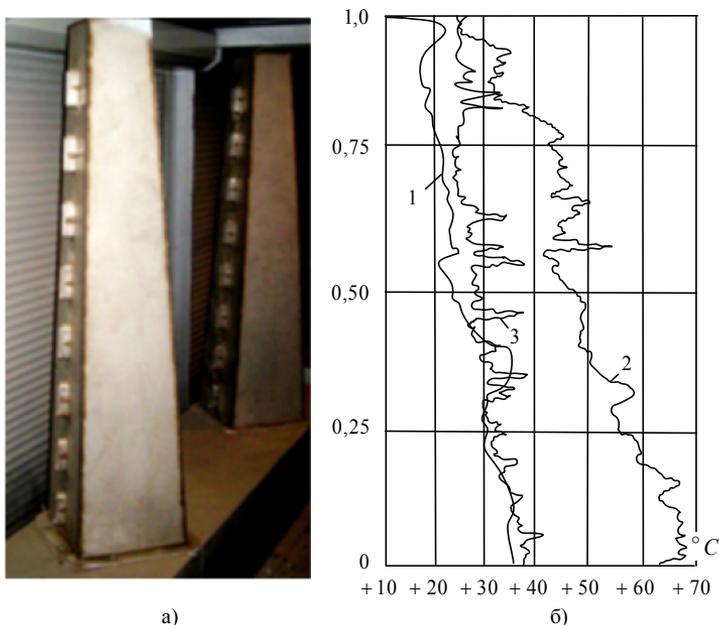


Рис. 9. Пирамида с соплами распределения горячего воздуха на входе КВОУ (а) и изменение температуры по высоте сопл при включенной АОС (б): 1 – минимальная; 2 – максимальная; 3 – средняя

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

$$G_{KBOY} \cdot c_{p,в}^{KBOY} \cdot t_{н,в}^{KBOY} = G_{н,в} \cdot c_{p,н,в} \cdot t_{н,в} + 10 \cdot G_{p,в} \cdot c_{p,в}^{AOC} \cdot t_{н,в}^{AOC} \quad (1)$$

можно оценить величину нагрева воздуха при включении АОС:

$$\Delta t_{н,в}^{KBOY} = t_{н,в}^{KBOY} - t_{н,в} = \frac{G_{н,в} \cdot c_{p,н,в} \cdot t_{н,в} + 10 \cdot G_{p,в} \cdot c_{p,в}^{AOC} \cdot t_{н,в}^{AOC}}{G_{KBOY} \cdot c_{p,в}^{KBOY}} - t_{н,в} \quad (2)$$

Здесь G_{KBOY} – суммарный расход воздуха через КВОУ, кг/с; $G_{н,в}$ – расход наружного воздуха через КВОУ, кг/с; G_{10} – расход воздуха АОС, кг/с; $c_{p,в}^{KBOY}$ – изобарная теплоемкость подогретого воздуха АОС, кДж/(кг·К); $c_{p,н,в}$ – изобарная теплоемкость наружного воздуха пе-

ред КВОУ, кДж/(кг·К); $c_{p,g}^{AOC}$ – изобарная теплоемкость воздуха АОС перед фильтрами КВОУ, кДж/(кг·К); t_6^{KBOY} – температура подогретого воздуха, °С; $t_{н.в}$ – температура наружного воздуха перед КВОУ, °С; t_6^{AOC} – температура воздуха АОС перед КВОУ, °С.

Результаты расчета сведены в таблицу.

Таблица. Эффективность работы АОС ГТЭ-110

Величина	Температура наружного воздуха, °С				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 $-5\text{ °С} \leq t_{н.в.} \leq +5\text{ °С}$
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, °С	295	287	286	280	Расчет [6]
Температура горячего воздуха перед фильтрами КВОУ, °С	67	64	63	60	Данные натуральных испытаний. Температура воздуха принята равной температуре поверхности металла сопел подачи горячего воздуха АОС КВОУ
Величина нагрева воздуха при включении АОС, °С	1	1	1	2,6	Расчет [6]
Температура подогретого воздуха перед фильтрами КВОУ, °С	+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 ($-10\text{ °С} < t_{н.в.} < +5\text{ °С}$) был выполнен термографический контроль (25.02.2009 г.) с помощью тепловизора (рис. 10, 11).

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

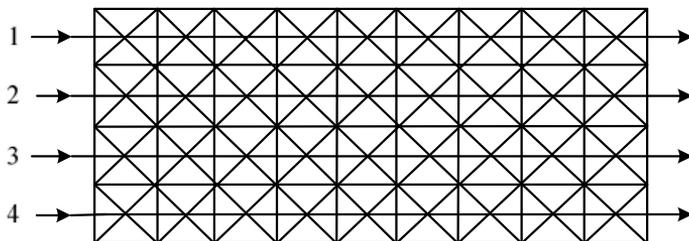
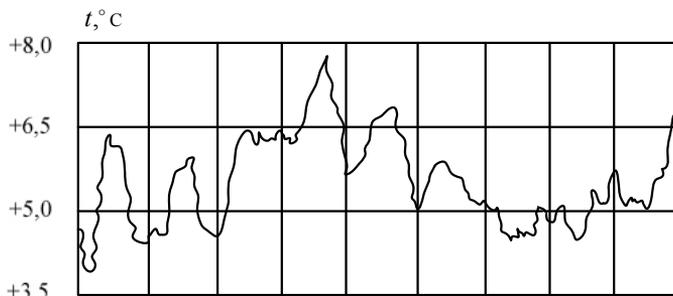
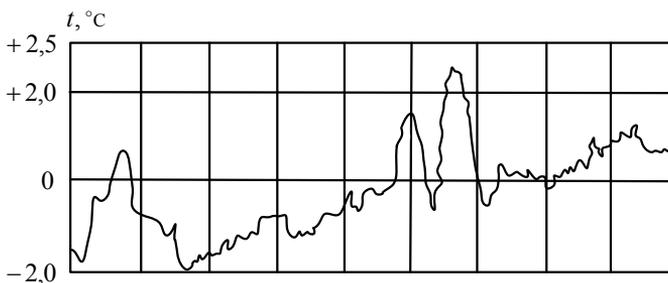


Рис. 10. Схема термографического контроля поверхностей фильтров КВОУ: 1 ÷ 4 – линии трассирования поверхностей фильтров тепловизором



а)



б)

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

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

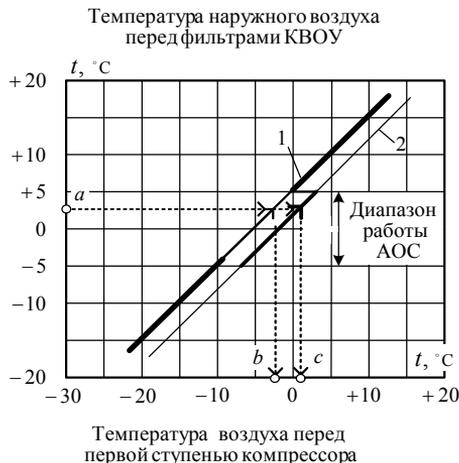


Рис. 12. Режимная характеристика АОС при относительной влажности наружного воздуха $\varphi = 80\%$ по результатам расчетов [6]:
 1 – АОС отключена; 2 – АОС включена; точки: *a* – температура наружного воздуха перед фильтрами КВОУ; *b* – температура перед первой ступенью компрессора при отключенной АОС; *c* – 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 $N_{эл.}^{ГТУ} = 100$ МВт) одновременно САУиР ГТЭ увеличивается расход топливного газа в камеру сгорания на величину $\Delta G_{III} \approx 150 \div 200 \text{ м}^3/\text{ч} = 301 \div 402 \text{ г/с}$ (плотность топливного (природного) газа принята $\rho_{гз} = 0,7231 \text{ кг/м}^3$).

Выводы

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.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 52200-2004 (ИСО 3977-2:1997). Установки газотурбинные. Нормальные условия и номинальные показатели.

2. **Стационарные** газотурбинные установки: Справочник / Л.В. Арсеньев [и др.]. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1989.

3. **Карачев**, Андрей Иванович. О некоторых итогах эксплуатации современных отечественных ПГУ / А.И. Карачев, И.В. Будаков, В.С. Рабенко // Новое в российской электроэнергетике: электронный журнал ОАО РАО «ЕЭС России». – 2007. – № 12. – 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**, Владимир Степанович. Тепловой расчет двухконтурной парогазовой установки утилизационного типа: учеб. пособие / В.С. Рабенко, И.В. Будаков, М.А. Алексеев. – Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2008.