

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОПАРОВОЙ ТЭЦ С ПАРОТУРБИНЫМ ПРИВОДОМ КОМПРЕССОРА

Д-р техн. наук, проф. **Тян В.К.**<sup>1</sup>

Канд. техн. наук, доц. **Шелудько Л.П.**<sup>1</sup>

Канд. техн. наук, доц. **Гулина С.А.**<sup>1</sup>

Д-р техн. наук, проф. **Бирюк В.В.**<sup>2</sup>

Канд. техн. наук, доц. **Горюнова И.Ю.**<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный технический университет г. Самара

<sup>2</sup>Самарский университет г. Самара

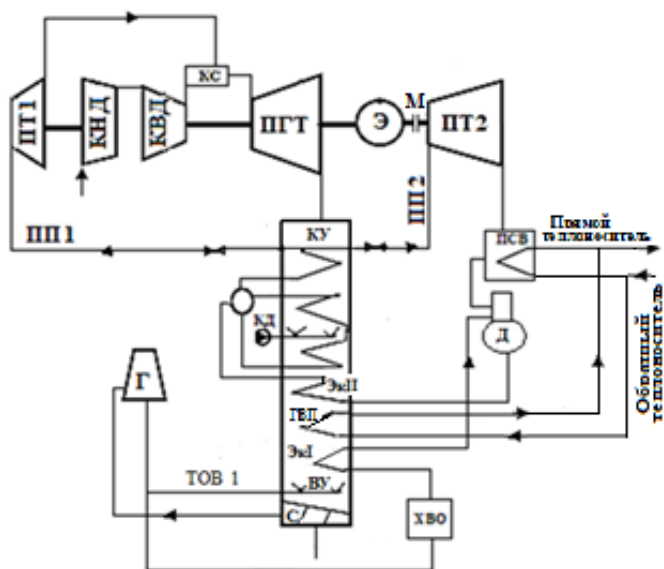
<sup>3</sup>Уральский федеральный университет

**Аннотация.** Рассмотрен новый тип маневренной газопаровой ТЭЦ (ГПУ-ТЭЦ) с паротурбинным приводом компрессора низкого давления. Разработана математическая модель технологических процессов в элементах этой установки. Предлагаемая схема за счет применения парового привода компрессора установки в котле-утилизаторе двухступенчатого испарителя с камерой дожигания, конденсации паровой составляющей газопаровой смеси, а также двух противоавлапческих паровых турбин обладает повышенной тепловой экономичностью и высокой маневренностью со значительным увеличением выработки электрической и тепловой энергии в отопительные периоды года.

**Ключевые слова:** электрическая и тепловая мощность, котел-утилизатор, противоавлапческая паровая турбина, газотурбинная установка, парогазовая турбина, паровой привод компрессора.

Одной из актуальных проблем энергетики является создание теплофикационных ПГУ-ТЭЦ с высоким уровнем когенерационной выработки тепловой и электрической энергии. Для повышения тепловой и электрической мощности в отопительных режимах их работы в патенте [1] было предложено применить в котле-утилизаторе (КУ) двухступенчатый испаритель с камерой дожигания топлива (КД) между его ступенями, снабдить эту ПГУ-ТЭЦ двумя противоавлапческими турбины с сетевыми подогревателями. Это позволяет за счет сжигания топлива в КД увеличить выработку пара в КУ и значительно повысить электрическую и тепловую мощность. Эти мероприятия способствуют повышению маневренных характеристик ПГУ-ТЭЦ. В патенте [2] предложена схема газопаровой теплоэлектроцентрали, в которой пар расширенный в противоавлапческой паровой турбине (ПТ) смешивают в камере сгорания (КС) с продуктами сгорания топ-

лива. Полученную смесь расширяют в газопаровой турбине (ГПТ) приводящей электрогенератор. В установке предусмотрена контактная конденсация паровой составляющей газопаровой смеси. В статье [3] проведено сравнение характеристик ПГУ с паровым и газотурбинным приводами компрессоров. Установлено, что паровой привод компрессора способствует уменьшению степени повышения давления воздуха в компрессоре и повышению температуры газа перед КУ. В заявке на изобретение [4] авторами был предложен новый тип газопаровой ГПУ-ТЭЦ, обладающей высокой мобильностью при работе, как в неотапительный, так и отопительные периоды года и повышенной тепловой экономичностью. Схема установки (рис. 1) содержит газотурбинную установку (ГТУ), котел утилизатор с двухступенчатым испарителем и камерой дожигания топлива, две противоаваленческие ПТ.



**Рис. 1. Принципиальная схема маневренной газопаровой теплоэлектростанции с паровым приводом компрессора**

Принцип работы заключается в следующем: атмосферный воздух сжимают в компрессоре низкого давления (КНД), приводимым от основной противоаваленческой паровой турбины ПТ1. Воздух сжимают в компрессоре высокого давления (КВД) и после подают в камеру сго-

рания (КС). Для увеличения доли пара в газопаровой смеси процесс горения в КС производят при небольшом коэффициенте избытка воздуха  $\alpha \approx 1,2$ . Такое соотношение топлива и воздуха обеспечит полное сгорание при небольшом расходе воздуха через компрессор. В камеру смешения КС подают пар, расширенный в ПТ1. Полученную парогазовую смесь расширяют в парогазовой турбине (ПГТ). Ее работу используют для привода КВД и электрогенератора (Э). Парогазовую смесь, расширенную в ПГТ, направляют в котел-утилизатор (КУ), где ее теплоту используют: для выработки перегретого пара высокого давления в экономайзере второй ступени (ЭкII), в испарителе и пароперегревателе, для подогрева сетевой воды теплосети, в газоводяном подогревателе ГВП и для подогрева питательной воды в экономайзере первой ступени (ЭкI). Как и в работе [1] для повышения маневренных характеристик установки в отопительный период в КД добавляют дополнительное топливо и увеличивают выработку пара в КУ. Этот пар подают в ПТ2 для увеличения выработки электроэнергии и подогрева сетевой воды в ПСВ. При изменении температуры наружного воздуха паропроизводительность КУ регулируют за счет изменения расхода топлива в КД.

Особенностью данной схемы является привод КНД от паровой турбины ПТ1, а КВД от турбины ГТУ. Ввод пара в зону смешения КС позволяет увеличить работу расширения газопаровой смеси и повысить ее мощность. В КУ предусмотрено использование теплоты конденсации водяного пара из газопаровой смеси и возвращение конденсата в цикл. Её высокопотенциальное тепло используется для генерации пара в КУ, а низкопотенциальное тепло используется в ГВС для подогрева сетевой воды теплосети.

От выбора суммарной степени повышения давления в компрессоре  $\pi_{\Sigma К} = \pi_{КНД} \cdot \pi_{КВД}$  зависит величина полезной работы цикла ГТУ  $L_e$  и получение в КС значения  $\alpha$  на уровне 1,15...1,25. Рассчитана мощность, потребляемая компрессором  $N_K$ , в зависимости от расхода воздуха  $G_B$  через него при различных  $\pi_{\Sigma К}$  приведена на рис. 2. Мощность компрессора увеличивается при увеличении  $\pi_{\Sigma К}$  и расхода сжимаемого воздуха  $G_B$ . Параметры пара на входе в КС задаются с учетом параметров пара перед типовыми противодавленческими турбинами и уровнем гидравлических потерь в паровом тракте. Принято:  $P_{н.н} = 9,0$  до 13,0 МПа;  $T_{н.н} = 818\text{К}$ ;  $P_{н.н} = 1,6$  МПа;  $T_{н.н} = 513\text{К}$ .

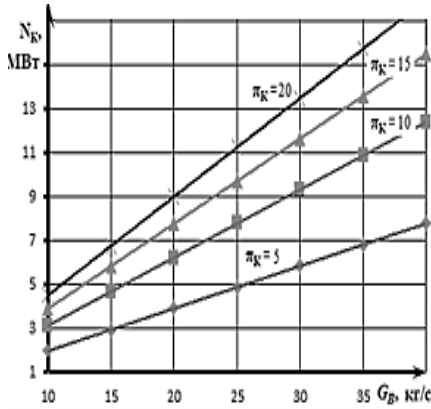


Рис. 2. Зависимость мощности, потребляемой компрессором  $N_K$  от расхода воздуха  $G_B$  при различных  $\pi_{\Sigma K}$

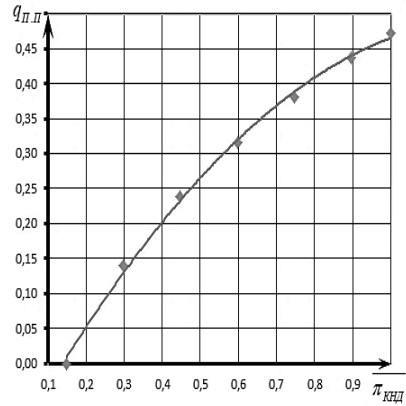


Рис. 3. Зависимость  $q_{п.п}$  от относительной  $\pi_{кнд}$

Расход пара через ПТ определяется заданным  $G_B$  и  $\pi_{кнд}$  [5]. На рис. 3 приведена зависимость относительного расхода пара через ПТ1

от распределения  $\pi_K$  по каскадам компрессора, где  $\pi_{кнд} = \frac{\pi_{кнд}}{\pi_{\Sigma K}}$ .

Применение в КНД с пониженной величины  $\pi_{кнд}$  позволяет уменьшить расход перегретого пара и снизить мощность приводной ПТ1 и паропроизводительность КУ в неотапительных режимах работы ГПУ-ТЭЦ. Характеристики газопаровой смеси в ПТТ и в КУ – расход, давление, энтальпии смеси определялись с учетом долей продуктов сгорания и пара [6,7]. Электрическая мощность газопаровой ГПУ-ТЭЦ в неотапительных режимах ее работы определяется:

$$N_{\Sigma} = G_B \left[ (1 - q_{ox} + q_T + q_{НП}) L_{ПТТ} \cdot \eta_M - L_{КВД} \right],$$

где:  $L_{ПТТ}$  - удельная работа парогазовой турбины,  $L_{КВД}$  - удельная работа КВД,  $\eta_M$  – механический КПД,  $G_B$  – массовый расход воздуха ГТУ,  $q_i$  – относительный расход рабочего тела (воздуха на охлаждение, топлива, насыщенного пара).

Энтальпия газопаровой смеси на выходе из парогенератора КУ:

$$h_{выхКУ} = \frac{(1 - q_{ox} + q_T) h_{ПТТ}^z - q_{НП} \cdot h_{ПТТ}^p}{(1 - q_{ox} + q_T + q_{НП})}$$

где:  $h_{ПГТ}^2$  – энтальпия парогазовой смеси,  $h_{ПГТ}^n$  – энтальпия парогазовой смеси на выходе из паровой части КУ.

Паропроизводительность КУ:

$$G_{ПΣ} = \frac{(1 - q_{ox} + q_T) h_{ПГТ}^2 - q_{НП} \cdot h_{ПГТ}^p}{(h_{выхКУ} - h_{ПВ})}$$

В отопительных режимах в КД сжигается дополнительное топливо с увеличением выработки пара в КУ для ПТ2, ее работа используется для привода электрогенератора. Суммарная электрическая мощность ПТ1 и ПТ2 в отопительных режимах газопаровой ПГУ-ТЭЦ:

$$N_{ЭΣ} = G_{ПГсм} L_{ПГТ} + G_{ПТ} L_{ПТ2} - G_B L_{КВД}, \quad L_{ПТ2} = (h_{ПТ} - h_{НП}) \eta_{ПТ},$$

где:  $L_{ПТ2}$  – удельная работа энергетической паровой турбины,  $h_{ПТ}$  – энтальпия перегретого пара,  $h_{НП}$  – адиабатическая энтальпия противодавления,  $\eta_{ПТ}$  – КПД паровой турбины 2.

Дополнительная электрическая мощность установки за счет расширения пара в ПТ2:

$$N_{ЭПТ2} = (G_{ПΣ} - G_{ПТ1}) L_{ПТ2}.$$

Суммарная электрическая мощность газопаровой ПГУ-ТЭЦ в отопительных режимах:

$$N_{ЭΣ} = G_B \left[ (1 - q_{ox} + q_T + q_{НП}) L_{ПГТ} \cdot \eta_M - L_{КВД} \right].$$

Относительный расход топлива в КД:

$$q_{мКД} = \frac{G_{мКД}}{G_{B2}} = \frac{h_{ВхКД}^* - h_{ВхКД}^* - h_T + h_B}{\eta_{КД} \cdot H - h_7^* + h_T},$$

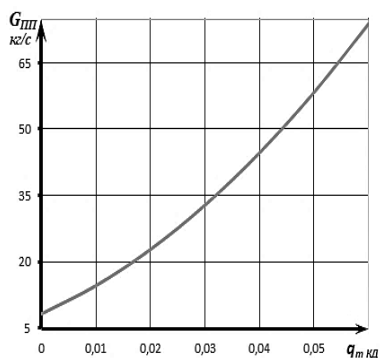
где:  $h_{ВхКД}^*$ ,  $h_{ВхКД}^*$  – энтальпии смеси перед и за камерой дожигания,  $G_{КДГ}$  – расход топлива в КД,  $h_T$  – энтальпия топливного газа,  $h_B$  – энтальпия воздуха.

Тепловая мощность установки в отопительных режимах:

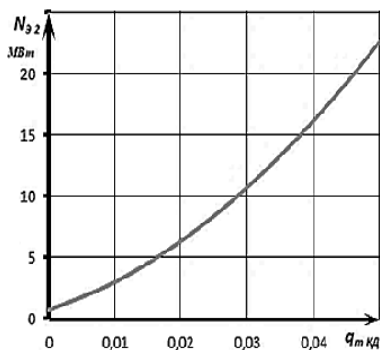
$$Q_{Σ} = Q_{СП} - Q_{ГВП}, \quad Q_{СП} = G_{ПΣ} \cdot r, \\ Q_{ГВП} = (G_{ПΣ} + G_{КД}) (h_{2КУ} - h_{УХ}) \eta_{ГВП},$$

где:  $Q_{СП}$  – теплота, вырабатываемая в ВСП;  $r$  – удельная теплота парообразования,  $Q_{ГВП}$  – тепловая энергия ГВП.

С использованием предложенной математической модели проведен анализ характеристик газопаровой ПГУ-ТЭЦ при ее работе в неотапительный и в отопительный периоды года. В расчетах были приняты: расход воздуха через компрессоры  $G_B = 25$  кг/с, степень повышения давления в КНД и в КВД  $\pi_{СК} = 6,4$ ; коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,2$ . Температура смеси перед ПГТ  $T_{ПГ} = 1100$  К. Параметры перегретого пара вырабатываемого в КУ – 13 МПа,  $540^0$  С [8]. Регулирование характеристик агрегатов производится в соответствии с режимами работы ПГУ путем изменения расходов топлива в КС и КД. На рис. 4, 5 показано влияние расхода топлива в КД на паропроизводительность КУ и на выработку дополнительной электрической мощности в ПТ2.



**Рис. 4. Зависимость паропроизводительности КУ от относительного расхода топливного газа в КД  $G_{ПП} = f(q_{mКД})$**



**Рис. 5. Зависимость дополнительной электрической мощности  $N_e$  от относительного расхода топлива  $q_{mКД}$  в КД**

Предложенная схема газопаровой установки с паровым приводом КНД при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,2$  в КС и подводе пара из ПТ1 в камеру смешения позволяет при небольшом уровне  $G_B$  и  $\pi_{СК}$  снизить металлоемкость конструкции компрессоров и ПТ1. Расширение в ПГТ газопаровой смеси способствует повышению температуры

перед КУ увеличивает его паропроизводительность. Установка между ступенями испарителя КД с вентилятором подачи в неё воздуха позволяет повысить тепловую и электрическую мощность ПГУ с увеличением показателей совместной когенерационной выработки тепловой и электрической энергии. Технологическая схема газопаровой ГПУ-ТЭЦ, относительно проста и имеет меньшие капитальные затраты по сравнению ПГУ бинарного цикла. Введение пара в камеру сгорания ГТД улучшает экологические характеристики ГПУ-ТЭЦ.

### Библиографический список

1. Патент РФ № 2650232. Теплофикационная парогазовая установка / В.В. Бирюк, Ю.Г. Кирсанов, М.Ю. Лившиц, А.Б. Цапкова, Л.П. Шелудько; Правообл. АО «Металлист-Самара»; Самарский Университет. Дата рег. 11.04.2018.
2. Патент РФ № 2409746. Парогазовая установка с паротурбинным приводом компрессора и регенеративной газовой турбиной / Л.П. Шелудько; Правообл. Самарский Университет. Дата публ. 20.01.2011.
3. Сравнительный анализ схем ПГУ с газотурбинным и паротурбинным приводами компрессора / А.Е. Зарянкин, В.А. Зарянкин, С.К. Сторожук, С.В. Арианов // Газотурбинные технологии. 2008. № 3. С. 46.
4. Заявка на изобретение РФ № 2019127680. Маневренная газопаровая теплоэлектроцентраль с паровым приводом компрессора / С.А. Гулина, В.К. Тянь, М.Ю. Лившиц, Л.П. Шелудько. Дата заявки 03.09.2019.
5. Газотурбинные энергетические установки / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Д. Земцов, Ф.С. Осыка. М.: Изд. дом МЭИ, 2011. 427 с.
6. Гулина С.А., Шелудько Л.П. Моделирование термодинамического цикла ГТД, работающего на газообразном топливе произвольного состава // Сб. тр. XXIX межд. научн. конф. «Математические методы в технике и технологиях ММТТ – 29». Том 12. Саратов, 2016. С 67-73.
7. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства газов. Справочник: в 2 т. М.: Энергоиздат, 1987. 288 с.
9. Парогазовые установки с дополнительным энергетическим котлом и паротурбинным приводом компрессора / А.Е. Зарянкин, В.А. Зарянкин, А.С. Магер, М.А. Носкова // Газотурбинные технологии. 2015. № 3. С. 40.
10. Блочная теплофикационная парогазовая установка / Е.А. Ларин, М.Ю. Лившиц, А.А. Шиманов, Л.П. Шелудько, А.А. Шиманов // ИФЖ. 2018. Т. 91, № 4. С. 1089-1097.