

Влияние впрыска водяного пара в камеру сгорания газотурбинной установки на эффективность работы котла-утилизатора

Кудинов А. А., доктор техн. наук, Горланов С. П., аспирант
ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»

Рассмотрено влияние впрыска водяного пара в камеру сгорания газотурбинной установки (ГТУ) на параметры работы котла-утилизатора (КУ). Выполнен термодинамический расчет КУ, установленного за ГТУ на базе двигателя НК-37. Выявлено, что при впрыске водяного пара в камеру сгорания ГТУ в количестве 4 % от объема подаваемого воздуха увеличивается тепловосприятие поверхностей нагрева КУ: экономайзера — с 6,00 до 6,85 МВт, испарителя — с 30,24 до 34,44 МВт, пароперегревателя — с 3,10 до 3,53 МВт. Отмечается рост паропроизводительности КУ с 15,32 до 17,44 кг/с (на 13,8 %).

Ключевые слова: газотурбинная установка, камера сгорания, водяной пар, впрыск, котел-утилизатор, термодинамический расчет, диаграмма тепловосприятия, эффективность работы.

В настоящее время на ТЭС для привода электрогенераторов стали широко использовать газовые турбины [1, 2]. Благодаря высокой маневренности ГТУ применяют в энергетике прежде всего для покрытия пиковых нагрузок и в качестве аварийного резерва для собственных нужд ТЭС. При работе ГТУ по простому циклу Брайтона по сравнению с паротурбинными установками они обладают меньшими КПД и единичной мощностью из-за возрастающих затрат энергии на собственные нужды, в том числе на привод турбокомпрессора. Повышение эффективности работы ГТУ может быть достигнуто, если в газовую турбину вместо низкоэнтальпийного агента (смеси продуктов сгорания с воздухом) подавать высокоэнтальпийный рабочий агент при той же начальной температуре. В продукты сгорания часто добавляют водяной пар. Газотурбинные установки с впрыском водяного пара получают все более широкое распространение в современной энергетике [3, 4]. Хорошие результаты в этом направлении обеспечиваются в результате применения ГТУ с впрыском пара в составе комбинированных парогазовых установок (ПГУ), что позволяет увеличить удельную мощность и КПД установки, уменьшить вредные выбросы, а также повысить общий коэффициент использования теплоты топлива.

Парогазовыми установками называют газотурбинные установки, в которых в качестве рабочих тел используются смеси паров воды и газов или раздельно газы и пар. Наиболее распространенными и перспективными парогазовыми установками являются ПГУ, оборудованные котлами-утилизаторами. Такие установки обладают высокой эффективностью при производстве электроэнергии и отличаются относительной простотой. При работе в конденсационном режиме ПГУ с КУ отпус-

кают потребителям электроэнергию с КПД 55 – 60 % [5].

В [6] представлены результаты термодинамического расчета ГТУ-25 на базе авиационного двигателя НК-37 с использованием конкретных характеристик всех его узлов. Установлено, что при применении впрыска водяного пара в камеру сгорания (КС) ГТУ эффективность ее работы повышается. При впрыске водяного пара в количестве 4 % от объема воздуха, подаваемого в камеру сгорания, электрическая мощность ГТУ возрастает с 30,2 до 35,2 МВт (на 5 МВт), а эффективный КПД повышается с 0,343 до 0,363 (на 2 %). При этом удельный расход газообразного топлива снижается с 222,8 до 191,2 г/(кВт·ч).

В рамках данной статьи рассматривается влияние впрыска водяного пара в камеру сгорания ГТУ на параметры работы КУ. Был выполнен термодинамический расчет КУ, установленного за ГТУ на базе двигателя НК-37. Установка смонтирована и эксплуатируется на Безьянской ТЭЦ ОАО «Волжская ТГК». Расчетная тепловая схема ГТУ с котлом-утилизатором приведена на рис. 1, где показаны параметры рабочих тел при работе установки без впрыска водяного пара в камеру сгорания.

Котел-утилизатор типа К-40/1,4-310-435 (модель ТКУ-6) с многократной принудительной циркуляцией предназначен для получения водяного пара за счет теплоты выхлопных газов стационарной ГТУ номинальной мощностью 25 МВт. Котел-утилизатор состоит из следующих основных частей: водяного экономайзера ЭК, барабана Б, циркуляционного насоса ЦН, испарителя ИСП, пароперегревателя ПП и газового подогревателя сетевой воды ГПСВ. Дымовые газы после КУ через дымовую трубу ДТ отводятся в атмосферу

[7]. Ниже приведены основные технические параметры КУ:

Номинальная паро-	
производительность, т/ч	40
Температура перегретого пара, °С	280
Давление перегретого пара, МПа	1,4
Температура питательной воды, °С	104
Температура уходящих газов при номинальной нагрузке (при работающем ГПСВ), °С	103
Производительность ГПСВ, т/ч	100
Давление сетевой воды, МПа	1,37 ± 0,07
Температура сетевой воды, °С:	
на входе	60
на выходе	120

Расчет КУ выполнен при фиксированных параметрах (давление, температура) перегретого пара, питательной и сетевой воды. Для удобства сравнения результатов расчета было принято, что генерируемый КУ водяной пар в полном объеме проходит через пароперегреватель, минуя байпасную линию. Исходными данными для расчета КУ служат следующие параметры:

- эффективная мощность ГТУ N_e^* , МВт;
- эффективный КПД ГТУ η_e^* ;
- температура газов за ГТУ $t_{ГТУ}''$, °С;
- температура газов на выходе из КУ $t_{ГКУ}''$, °С;
- расход газов $G_{Г}^*$, кг/с;
- коэффициент избытка воздуха в газах за ГТУ (перед КУ) $\alpha_{КУ}$;
- давление перегретого пара $p_{ПП}$, МПа;
- температура перегретого пара $t_{ПП}''$, °С;
- температура сетевой воды на входе и выходе ГПСВ: $t_{ГПСВ}'$ и $t_{ГПСВ}''$, °С;
- давление сетевой воды на входе и выходе ГПСВ: $p_{ГПСВ}'$ и $p_{ГПСВ}''$, МПа;
- расход сетевой воды через ГПСВ $G_{ГПСВ}$, кг/с;
- давление, создаваемое ЦН, $p_{ЦН}$, МПа;
- температура наружного воздуха $t_{н}$, °С.

Влияние температуры наружного воздуха на основные показатели работы ГТУ учитывали следующими коэффициентами:

$$K_N = 0,77 + 0,0062571(50 - t_{н});$$

$$K_G = 0,9 + 0,0028571(50 - t_{н});$$

$$K_{\eta} = 0,935 + 0,0018571(50 - t_{н});$$

$$K_T = 1,023 - 0,0006571(50 - t_{н}).$$

Тогда

$$N_e = N_e^* K_N;$$

$$G_{Г} = G_{Г}^* K_G;$$

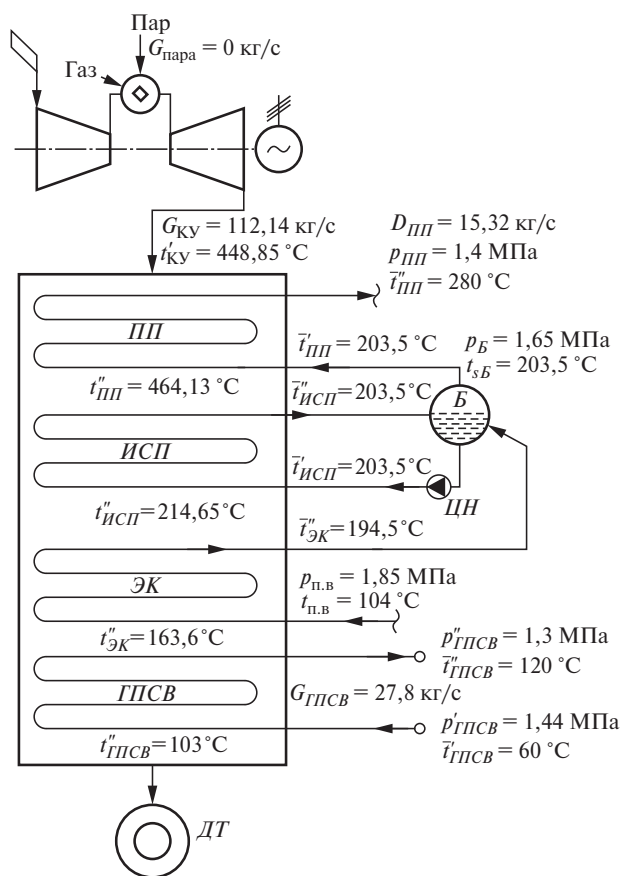


Рис. 1. Расчетная тепловая схема ГТУ с котлом-утилизатором при работе без выпуска водяного пара в камеру

$$\eta_e = \eta_e^* K_{\eta};$$

$$t_{Г}'' = t_{ГТУ}'' K_T.$$

Для выполнения последующих расчетов заданы потери давления в элементах тепловой схемы ГТУ с КУ:

- 1) в пароперегревателе — в диапазоне 0,2 – 0,3 МПа (0,25 МПа);
- 2) в трубопроводе между питательным насосом и барабаном КУ — в диапазоне 10 – 15 % (12 %) от давления в барабане КУ;
- 3) в водяном экономайзере — 5 % от давления в барабане КУ.

Заданы также минимальные температурные напоры с учетом того, что их уменьшение повышает экономичность ПГУ, но одновременно увеличивает металлоемкость, стоимость и аэродинамическое сопротивление поверхностей нагрева КУ:

1) температура воды за водяным экономайзером принимается меньше температуры насыщения в барабане на 9 °С из рекомендуемого диапазона 5 – 15 °С;

2) коэффициент ϕ сохранения теплоты в КУ принимается равным 0,995 из диапазона 0,994 – 0,996.

В соответствии с принятыми выше потерями давления определяем давления, МПа: в барабане котла $p_B = p_{ПП} + 0,25$, питательной воды $p_{п.в} = 1,12p_B$, за водяным экономайзером $p_{за ЭК} = 1,05p_B$.

По температуре газов на выходе из КУ $t''_Г$ находим энтальпию газов перед КУ (за ГТУ) $i''_Г$, кДж/кг, по π - i -номограммам для коэффициента избытка воздуха $\alpha_{КУ}$ [8]:

$$i''_Г = \pi - i [t''_Г, \alpha_{КУ}].$$

По давлению в барабане КУ с помощью таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара определяем: температуру насыщения $t_{сБ}$, °С; энтальпию кипящей жидкости в барабане котла $h'_Б$, кДж/кг; энтальпию сухого насыщенного пара в барабане котла $h''_Б$, кДж/кг.

Рассчитываем температуру питательной воды за водяным экономайзером: $t''_{ЭК} = t_{сБ} - 9$ °С. Энтальпию питательной воды за водяным экономайзером $h''_{ЭК}$, кДж/кг, находим по таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара.

По температуре газов за КУ $t''_{ГКУ}$ и $\alpha_{КУ}$ определяем энтальпию газов за КУ $i''_{ГКУ}$, кДж/кг, по π - i -номограммам:

$$i''_{ГКУ} = \pi - i [t''_{ГКУ}, \alpha_{КУ}].$$

С помощью таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара по давлениям $p'_{ГПСВ}$, $p''_{ГПСВ}$, МПа, и температурам $t'_{ГПСВ}$, $t''_{ГПСВ}$, °С, находим энтальпии сетевой воды на входе и на выходе из ГПСВ — $h'_{ГПСВ}$ и $h''_{ГПСВ}$.

Из уравнения теплового баланса для ГПСВ вычисляем энтальпию газов за ЭК (перед ГПСВ):

$$i''_{ЭК} = i''_{ГПСВ} + \frac{G_{ГПСВ}(h''_{ГПСВ} - h'_{ГПСВ})}{G_{ГФ}},$$

где $G_{Г}$ — массовый расход газов, кг/с.

По $i''_{ЭК}$ и $\alpha_{КУ}$ с помощью π - i -номограмм определяем температуру газов за водяным экономайзером (перед ГПСВ) $t''_{ЭК}$, °С.

Из уравнения теплового баланса для водяного экономайзера, испарителя и пароперегревателя вычисляем расход перегретого пара, кг/с, равный расходу питательной воды на входе в водяной экономайзер:

$$D_{ПП} = G_{п.в} = \frac{G_{Г}(i_{Г} - i''_{ЭК})\varphi}{h_{ПП} - h_{п.в}},$$

где $h_{ПП}$ и $h_{п.в}$ — энтальпии перегретого пара и питательной воды, кДж/кг.

Из уравнения энергии для водяного экономайзера находим энтальпию газов за ИСП (перед ЭК):

$$i''_{Г ИСП} = i'_{ЭК} = i''_{ЭК} + \frac{D_{ПП}(h''_{ЭК} - h_{п.в})}{G_{ГФ}}.$$

Температуру газов за испарителем (перед ЭК) $t''_{Г ИСП} = t''_{ЭК}$, °С, определяем по π - i -номограммам при $\alpha_{КУ}$ по найденной выше энтальпии.

Энтальпию котловой воды на входе в испаритель $h'_{ИСП}$ находим по таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара по давлению $p_{ЦН}$, МПа, создаваемому циркуляционным насосом, и температуре насыщения $t_{сБ}$, °С, в барабане котла.

Из уравнения теплового баланса, составленного для пароперегревателя, определяем энтальпию газов за ПП (на входе в ИСП):

$$i''_{Г ПП} = i'_{ИСП} + \frac{D_{ПП}(h''_Б - h'_{ИСП})}{G_{ГФ}}.$$

Температуру газов за ПП находим по π - i -номограммам при $\alpha_{КУ}$ по определенной выше энтальпии $i''_{Г ПП}$.

После расчета параметров состояния теплоносителей (газов, воды, пара) на входе и выходе всех теплообменных поверхностей котла-утилизатора рассчитываем тепловосприятие Q , МВт, для ГПСВ, ЭК, ИСП, ПП:

$$Q_{ГПСВ} = \frac{G_{Г}(i'_{Г ГПСВ} - i''_{Г ГПСВ})}{1000};$$

$$Q_{ЭК} = \frac{G_{Г}(i'_{ЭК} - i''_{ЭК})}{1000};$$

$$Q_{ИСП} = \frac{G_{Г}(i'_{Г ИСП} - i''_{Г ИСП})}{1000};$$

$$Q_{ПП} = \frac{G_{Г}(i'_{Г ПП} - i''_{Г ПП})}{1000}.$$

Основные результаты расчета котла-утилизатора представлены в таблице.

Температура газов в камере сгорания ГТУ равна 1283 °С как без впрыска пара, так и с впрыском. Температура газов за турбинами высокого, среднего и низкого давления и за свободной силовой турбиной с увеличением доли впрыскиваемого в КС водяного пара повышается. Это обусловлено увеличенным расходом рабочего тела с возросшей энтальпией.

Полученные данные были использованы для построения Q - t -диаграмм тепловосприятия поверхностями нагрева КУ при работе ГТУ без впрыска водяного пара в камеру сгорания и при работе ГТУ с впрыском во-

Параметр	Значение параметра при расходе впрыскиваемого пара $G_{\text{пара}}$, % от расхода воздуха, поступающего в КС ГТУ				
	0	1	2	3	4
Расход впрыскиваемого пара $G_{\text{пара}}$, кг/с	0	0,885	1,769	2,655	3,539
Паропроизводительность КУ $D_{\text{ПП}}$, кг/с	15,32	15,63	16,19	16,97	17,44
Тепловосприятие, МВт:					
$Q_{\text{ГПСВ}}$	7,03				
$Q_{\text{ЭК}}$	6,00	6,13	6,35	6,65	6,85
$Q_{\text{ИСП}}$	30,24	30,86	31,96	33,50	34,44
$Q_{\text{ПП}}$	3,10	3,17	3,28	3,44	3,53

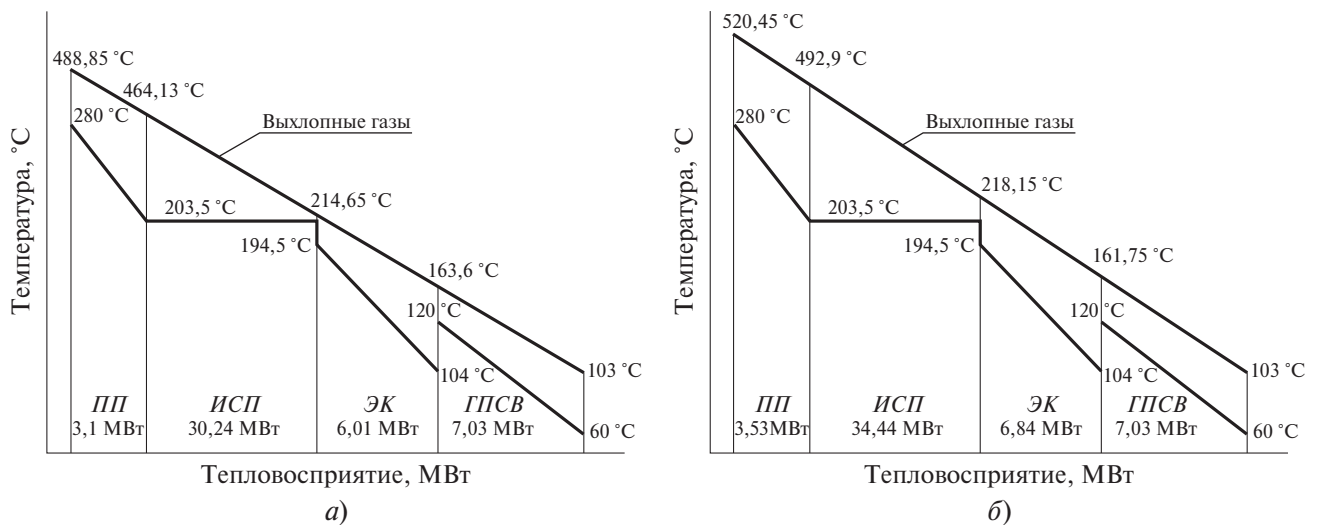


Рис. 2. $Q-t$ -диаграмма тепловосприятия поверхностями нагрева котла:

a — при работе ГТУ без впрыска водяного пара в камеру сгорания; *b* — при работе ГТУ с впрыском пара $G_{\text{пара}} = 4\%$ от расхода воздуха, поступающего в КС ГТУ

дяного пара в количестве $G_{\text{пара}} = 4\%$ от расхода воздуха, поступающего в камеру сгорания ГТУ (рис. 2).

Анализ результатов расчетов показывает, что при впрыске водяного пара в камеру сгорания ГТУ возрастает энтальпия газов (смеси продуктов сгорания с воздухом), что повышает электрическую мощность ГТУ и тепловую мощность КУ, снижает удельный расход топлива на выработку электрической и тепловой энергии.

Применение впрыска водяного пара в камеру сгорания ГТУ оказывает также влияние на экологические показатели работы установки — позволяет поддерживать концентрацию оксидов азота в выходных газах в пределах нормы.

Список литературы

1. Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

2. Кудинов А. А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование. — М.: ИНФРА-М, 2012.
3. Морозенко М. И. Исследование эффективности ГТУ с впрыском пара и водогрейным котлом. Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 2002.
4. Пат. РФ № 2482292 (RU). МПК⁷ C2 F 01 K 23/10. Парогазовая установка электростанции / А. А. Кудинов, С. К. Зиганшина, А. С. Сергеева, С. П. Горланов. — Изобретения. Полезные модели, 2013, № 14.
5. Кудинов А. А., Зиганшина С. К. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. — М.: Машиностроение, 2011.
6. Кудинов А. А., Горланов С. П. Анализ впрыска водяного пара в камеру сгорания газотурбинной установки на базе двигателя НК-37. — Промышленная энергетика, 2013, № 7.
7. Кудинов А. А. Парогазовые установки тепловых электрических станций. — Самара: СамГТУ, 2009.
8. Дорофеев В. М., Маслов В. Г., Первышин Н. В. Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок. — М.: Машиностроение, 1973.