

ходит снижение электрической мощности. Суммарные капитальные вложения с ростом давления практически не меняются: при увеличении давления в рассмотренном диапазоне - уменьшаются на 0,75 % – 0,73%. Прирост ЧДД не наблюдается.

5. Исходя из вышеизложенного, следует отметить, что технико-экономическая эффективность ПГУ-П в наибольшей степени определяется температурным графиком теплосети – температурами прямой и обратной сетевой воды. Изменение начальных параметров пара оказывает незначительное влияние на показатели ПГУ-П.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Антонова А.М., Уваров А.А. Анализ тепловой эффективности ПГУ с противодавлением методом малых отклонений. - Материалы IV Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы». - Томск, 2016.
2. Паровые и газовые установки электростанций: учебное пособие для вузов / А.Д. Трухний. - М.: Издательский дом МЭИ, 2013. - 648 с.
3. Девянин А.В. Оптимизация параметров тепловых схем трехконтурных парогазовых установок Москва. 2009 г. - 20 с. Автореферат дисс. на соискание уч.степени канд.техн.наук.

Научный руководитель: А.М. Антонова, к.т.н., доцент кафедры АТЭС ТПУ.

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПГУ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ МЕТОДОМ МАЛЫХ ОТКЛОНЕНИЙ

А.М. Антонова, А.А. Уваров
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

Парогазовые установки (ПГУ), позволяющие значительно повысить эффективность и экологическую безопасность тепловой энергетики, в последние годы активно реализуются в мировой энергетике. Наиболее эффективны бинарные ПГУ утилизационного типа на базе современных высокотемпературных газотурбинных установок (ГТУ) [1]. Такие ПГУ значительно превосходят традиционные паротурбинные энергоблоки по термодинамической эффективности и экологическим показателям. Стремление еще более повысить эффективность ПГУ приводит к необходимости рассмотрения установок на когенерационном парогазовом цикле с применением противодавленческой паровой турбины (ПГУ-П) [2]. Они и являются объектом данного исследования.

В ПГУ-П утилизация теплоты отработавших газов ГТУ в котле-утилизаторе (КУ) происходит на двух участках теплофикационного цикла: при получении перегретого пара и при нагреве обратной сетевой воды в хвостовых

поверхностях КУ. Теплота отработавшего пара утилизируется при передаче ее потребителю технологического пара или сетевой воде, подаваемой в прямую сеть.

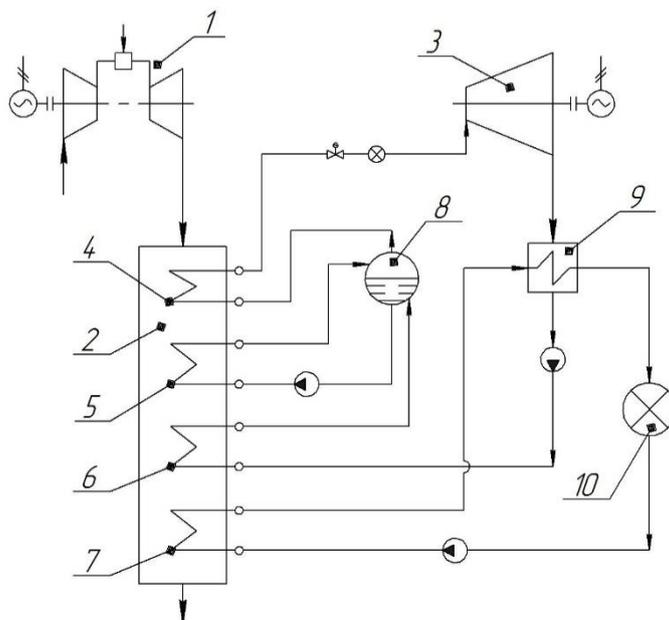


Рис. 1. Схема ПГУ с противодавленческой паровой турбиной: 1 – ГТУ; 2 – КУ; 3 – паровая турбина; 4 – пароперегреватель; 5 – испаритель; 6 – экономайзер; 7 – ГСП; 8 – барабан; 9 – СП; 10 – тепловой потребитель.

Схема ПГУ-П очень проста, поскольку отсутствует необходимость использования нескольких уровней давления пара и промежуточного перегрева пара. На рис. 1 показана схема ПГУ-П с сетевым подогревателем (СП), снабжающей теплотой потребителей отопления и горячего водоснабжения.

Повышение эффективности КУ и установки в целом достигается глубокой утилизацией теплоты за счет снижения температуры уходящих газов при передаче теплоты обратной сетевой воде в газовой сетевом подогревателе (ГСП). Температурный график теплосети является определяющим для характеристик паровой части ПГУ-П, поскольку температура прямой сетевой воды определяет давление отработавшего пара на выхлопе паровой турбины.

Тепловую эффективность ПГУ можно оценить с помощью так называемого полного коэффициент полезного действия ПГУ, показывающего долю теплоты топлива, полезно использованной в установке.

Полезно использованная теплота складывается из электрической мощности ПГУ $N_{э}$ и тепловой мощности, переданной тепловым потребителям $Q_{ТП}$.

Полный коэффициент полезного действия ПГУ $\eta_{ПГУ} = \frac{N_{э} + Q_{ТП}}{Q_{КС}}$, здесь $Q_{КС}$ – теплота, подводимая от топлива к рабочему телу в камере сгорания ГТУ.

В свою очередь, электрическая мощность ПГУ является суммой двух слагаемых $N_{э} = N_{э}^I + N_{э}^II$, где $N_{э}^I$, $N_{э}^II$ – электрические мощности газовой и паровой ступеней ПГУ.

Преобразуем формулу полного коэффициента полезного действия ПГУ

$$\eta_{ПГУ} = \frac{N_{\text{Э}} + Q_{\text{ТП}}}{Q_{\text{КС}}} = \frac{N_{\text{Э}}^{\Gamma} + N_{\text{Э}}^{\Pi} + Q_{\text{ТП}}}{Q_{\text{КС}}} = \frac{N_{\text{Э}}^{\Gamma}}{Q_{\text{КС}}} + \frac{N_{\text{Э}}^{\Pi} + Q_{\text{ТП}}}{Q_{\text{КС}}} \quad (1)$$

Первое слагаемое в этой формуле – КПД газотурбинной установки

$$\eta_{ГТУ} = \frac{N_{\text{Э}}^{\Gamma}}{Q_{\text{КС}}}.$$

Из энергетического баланса ПГУ следует: $Q_{\text{КС}} = N_{\text{Э}}^{\Gamma} + Q_{\text{КВ}}^{\Pi} + \Delta Q_{\text{yx}}$, (2)

здесь ΔQ_{yx} – потеря теплоты с уходящими из котла-утилизатора газами;

$Q_{\text{КВ}}^{\Pi}$ – полезная мощность котла-утилизатора. Выразим $Q_{\text{КВ}}^{\Pi}$ из (2):

$$Q_{\text{КВ}}^{\Pi} = Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma} - \Delta Q_{\text{yx}}. \quad (3)$$

Потерю теплоты с уходящими газами ΔQ_{yx} определим, используя выражение для КПД котла-утилизатора:

$$\eta_{\text{КУ}} = \frac{Q_{\text{КВ}}^{\Pi}}{Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma}} = \frac{Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma} - \Delta Q_{\text{yx}}}{Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma}}, \quad (4)$$

здесь знаменатель является теплотой отработавших газов ГТУ, с которой они поступают в КУ. Отсюда $\Delta Q_{\text{yx}} = (1 - \eta_{\text{КУ}})(Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma})$.

Подставляя это выражение в (3), получим, что полезная мощность котла-утилизатора равна:

$$Q_{\text{КВ}}^{\Pi} = Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma} - (1 - \eta_{\text{КУ}})(Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma}) = (Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma}) \cdot \eta_{\text{КУ}}. \quad (5)$$

С другой стороны, полезная мощность котла-утилизатора расходуется на две составляющих – электрическую мощность паровой части ПГУ $N_{\text{Э}}^{\Pi}$ и тепловую мощность, отпускаемую тепловому потребителю $Q_{\text{ТП}}$:

$$Q_{\text{КВ}}^{\Pi} = N_{\text{Э}}^{\Pi} + Q_{\text{ТП}}. \quad (6)$$

Приравнивая правые части выражений (5) и (6), получим

$$N_{\text{Э}}^{\Pi} + Q_{\text{ТП}} = (Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma}) \eta_{\text{КУ}}. \quad (7)$$

Отсюда, подставляя $N_{\text{Э}}^{\Pi} + Q_{\text{ТП}}$ из (7) в (1), получим:

$$\eta_{ПГУ} = \frac{N_{\text{Э}}^{\Gamma}}{Q_{\text{КС}}} + \frac{N_{\text{Э}}^{\Pi} + Q_{\text{ТП}}}{Q_{\text{КС}}} = \eta_{ГТУ} + \frac{Q_{\text{КС}}(1 - \eta_{ГТУ})\eta_{\text{КУ}}}{Q_{\text{КС}}} = \eta_{ГТУ} + (1 - \eta_{ГТУ}) \cdot \eta_{\text{КУ}}.$$

Таким образом, полный коэффициент полезного действия ПГУ-П:

$$\eta_{ПГУ} = \eta_{ГТУ} + (1 - \eta_{ГТУ}) \cdot \eta_{\text{КУ}}. \quad (8)$$

В этой формуле отсутствует КПД паротурбинной установки или какой-либо другой фактор, характеризующий ее экономичность. Отсюда следует вывод, что эффективность парогазовой установки с противодавленческой турбиной не зависит от экономичности ПТУ. Объясняется это тем, что ПТУ работает без потерь в цикле: теплота конденсации отработавшего водяного пара полностью используется для покрытия нагрузки тепловых потребителей.

Метод малых отклонений [3] позволяет получить решение в общем и численном виде, используя результаты расчета некоторого базового варианта.

Метод основан на линеаризации уравнений – математическом приеме, включающем дифференцирование уравнений и последующую замену значений величин их относительными изменениями. В итоге исходное аналитическое уравнение заменяется на уравнение в малых отклонениях входящих в него аргументов. Полученная явная аналитическая зависимость связывает изменения исходных переменных и изменения функции, что дает возможность провести анализ изменения функции с помощью коэффициентов влияния переменных величин. Это особенно необходимо при большом числе аргументов и нелинейных связях между ними и функцией.

Следуя положениям метода малых отклонений, продифференцируем выражение полного КПД ПГУ-П (8):

$$d\eta_{ПГУ} = \frac{\partial \eta_{ПГУ}}{\partial \eta_{ГТУ}} d\eta_{ГТУ} + \frac{\partial \eta_{ПГУ}}{\partial \eta_{КВ}} d\eta_{КВ} \quad (9)$$

Здесь частные производные: $\frac{\partial \eta_{ПГУ}}{\partial \eta_{ГТУ}} = 1 - \eta_{КВ}$; $\frac{\partial \eta_{ПГУ}}{\partial \eta_{КВ}} = 1 - \eta_{ГТУ}$.

Подставляя частные производные в (7), имеем:

$$d\eta_{ПГУ} = (1 - \eta_{КВ}) d\eta_{ГТУ} + (1 - \eta_{ГТУ}) d\eta_{КВ}$$

Перейдем к конечным приращениям и затем к относительным отклонениям:

$$\Delta \eta_{ПГУ} = (1 - \eta_{КВ}) \Delta \eta_{ГТУ} + (1 - \eta_{ГТУ}) \Delta \eta_{КВ}$$

$$\frac{\Delta \eta_{ПГУ}}{\eta_{ПГУ}} = \frac{1}{\eta_{ПГУ}} \left[(1 - \eta_{КВ}) \eta_{ГТУ} \frac{\Delta \eta_{ГТУ}}{\eta_{ГТУ}} + (1 - \eta_{ГТУ}) \eta_{КВ} \frac{\Delta \eta_{КВ}}{\eta_{КВ}} \right]$$

Переходя к обозначениям коэффициентов при переменных, получим:

$$\delta \eta_{ПГУ} = K_1 \delta \eta_{ГТУ} + K_2 \delta \eta_{КВ} \quad (10)$$

Здесь коэффициенты влияния K_1 и K_2 определяются через величины «базового» варианта, имеющие в формулах индекс «0»:

$$K_1 = \frac{(1 - \eta_{КВ0}) \eta_{ГТУ0}}{\eta_{ПГУ0}}; \quad K_2 = \frac{(1 - \eta_{ГТУ0}) \eta_{КВ0}}{\eta_{ПГУ0}}$$

Для значений переменных в базовом варианте ПГУ-П [4]:

$$\eta_{ГТУ0} = 0,3537; \quad \eta_{ПГУ0} = 0,8847; \quad \eta_{КВ0} = 0,8281,$$

значения коэффициентов влияния составляют: $K_1 = 0,0687$, $K_2 = 0,6050$.

С учетом полученных значений получаем зависимость КПД рассматриваемой парогазовой установки ПГУ-П от влияющих факторов в форме уравнения в малых отклонениях:

$$\delta \eta_{ПГУ} = 0,0687 \cdot \delta \eta_{ГТУ} + 0,6050 \cdot \delta \eta_{КВ} \quad (11)$$

Анализ уравнения показывает, что эффективность использования теплоты отработавших в ГТУ газов в котле-утилизаторе оказывает на коэффициент использования теплоты топлива на порядок большее влияние, чем КПД ГТУ значение $\eta_{КВ}$, т.е. при изменении $\eta_{КВ}$ на 1 % КПД ПГУ изменяется на 0,6050 %. Увеличение КПД ГТУ на 1 % ведет к росту КПД ПГУ на 0,0687 %. Определя-

ющее значение имеет температура уходящих газов на выходе из КУ, которая

Тепловая эффективность ПГУ-П

Анализ эффективности ПГУ-П методом малых отклонений

Выводы

в ПГУ-П однозначно зависит от температуры обратной сетевой воды.

Простая схема установки ввиду одноконтурности и отсутствия промежуточного перегрева пара обеспечивает повышенную надежность ПГУ-П.

Экономичность паротурбинной установки не влияет на тепловую эффективность ПГУ-П, поскольку ПГУ работает без потерь в цикле.

Наибольшее влияние на тепловую эффективность ПГУ-П оказывает полнота использования теплоты отработавших в ГТУ газов в КУ, т.е. выбор температурного графика теплосети определяет КПД КУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ольховский Г.Г. Перспективные газотурбинные и парогазовые установки для энергетики (обзор) // Теплоэнергетика. - 2013. - № 2.- С. 3-12.
2. Гуцин, А.В. Парогазовая ТЭЦ Siemens для города Гетеборг (Швеция) // Турбины и дизели (сентябрь - октябрь) 2007. - С. 16-21.
3. Ольховский Г.Г. Энергетические газотурбинные установки. - М.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
4. Уваров А.А., Антонова А.М. Техничко-экономическая эффективность ПГУ с противодавлением. - Материалы IV Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы». - Томск, 2016.

Научный руководитель: А.М. Антонова, к.т.н., доцент кафедры АТЭС ЭНИН ТПУ.

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ОСАДКОВ В АТМОСФЕРЕ

Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин, С.А. Шваб
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

Одним из факторов негативного воздействия тепловых электрических станций (ТЭС) на окружающую среду является возможное образование кислотных осадков в районах, непосредственно прилегающих к ТЭС [1]. При сжигании топлив в окружающую среду поступают различные загрязняющие вещества [1].

В работе рассматриваются процессы конденсации серного ангидрида SO_3 и водяного пара H_2O . Серный ангидрид образуется в газоходах котлов тепловых электрических станций (ТЭС) путем частичного окисления SO_2 (до 5% от общей доли SO_2) при сжигании высокосернистых топлив, и относится к классу