

## УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ И ПАРА НА ВЫХОДЕ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА КГПУ С ВВОДОМ ПАРА В КАМЕРУ СГОРАНИЯ

Е.С. Болдушевский, А.А. Туболев, Н.Н. Галашов

Томский политехнический университет,  
Инженерная школа энергетики, НОЦ И.Н. Бутакова

Научный руководитель: Н.Н. Галашов, к.т.н., доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ ТПУ.

Ввод пара в камеру сгорания (КС) контактной газопаровой установки (КГПУ) эффективный и простой способ увеличения ее мощности и КПД [1, 2], а также снижения выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  [3, 4]. Для получения этого пара за газовой турбиной (ГТ) устанавливают котел-утилизатор (КУ).

В [5] была разработана программа расчета тепловых схем КГПУ. Расчеты показали, что ввод пара в КС повышает КПД только при температурах газопаровой смеси на выходе КС выше  $900^\circ\text{C}$ . При этом значительное увеличение КПД достигается при температуре выше  $1100^\circ\text{C}$ . Также было определено, что температура газопаровой смеси на выходе ГТ достигает  $700\text{--}900^\circ\text{C}$ , поэтому на выходе КУ можно получать перегретый пара до  $650\text{--}800^\circ\text{C}$ . В работе [6] проведены расчеты с температурами вводимого в КС пара  $525\text{--}780^\circ\text{C}$ . На рис. 1–3 приведены зависимости изменения электрического КПД нетто, расхода и температуры вводимого в КС пара от степени сжатия в компрессоре и температуры газопаровой смеси на выходе КС.

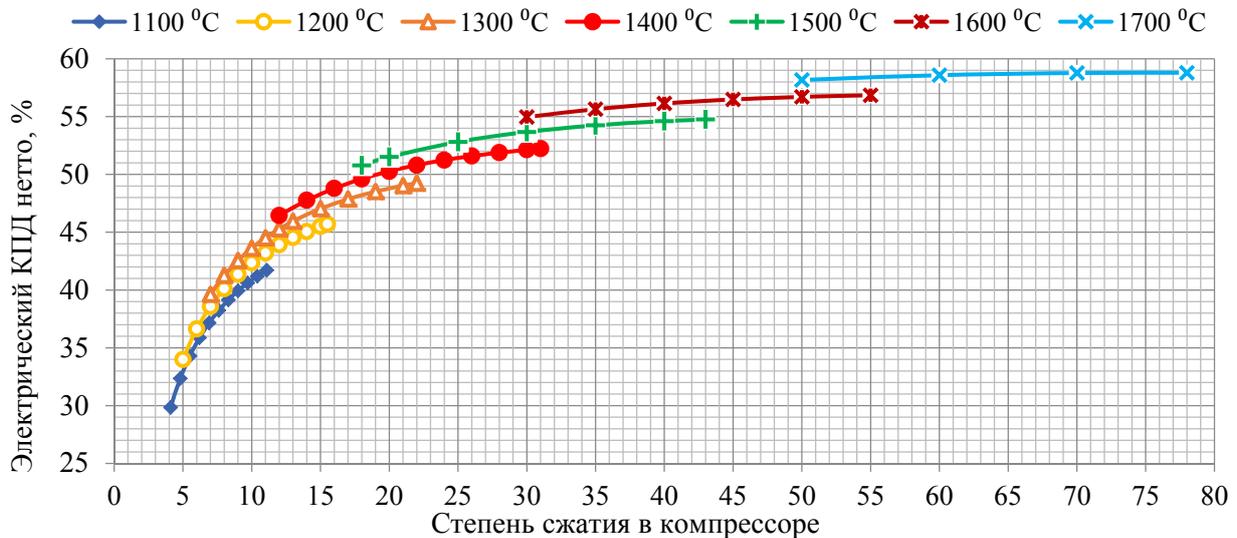


Рис. 1. Зависимость электрического КПД нетто от степени сжатия в компрессоре и температуры газопаровой смеси на выходе КС

Представленные зависимости говорят о высокой эффективности КГПУ, особенно при высоких температурах газопаровой смеси на выходе КС и большой степени сжатия в компрессоре. При этом с увеличением температуры газопаровой смеси на выходе КС и степени сжатия в компрессоре КПД значительно возрастает, а расход и температура, вводимого в КС пара, существенно снижаются.

Кроме высокого КПД, сравнимого с работающими парогазовыми установками, достоинством КГПУ являются низкие капитальные затраты и простая тепловая схема, а их главный недостаток – большие потери теплоты и пара с уходящими газами. При этом также происходит загрязнение атмосферы паром.

Уменьшить потери теплоты и пара с уходящими газами можно путем установки на выходе КУ конденсационного теплоутилизатора. Теоретические вопросы применения теплоутилизаторов в котельных и на ТЭС рассмотрены в [7–9]. Расчет тепловой схемы с ПГУ с теплоутилизатором для отпуски теплоты приведен в [10].

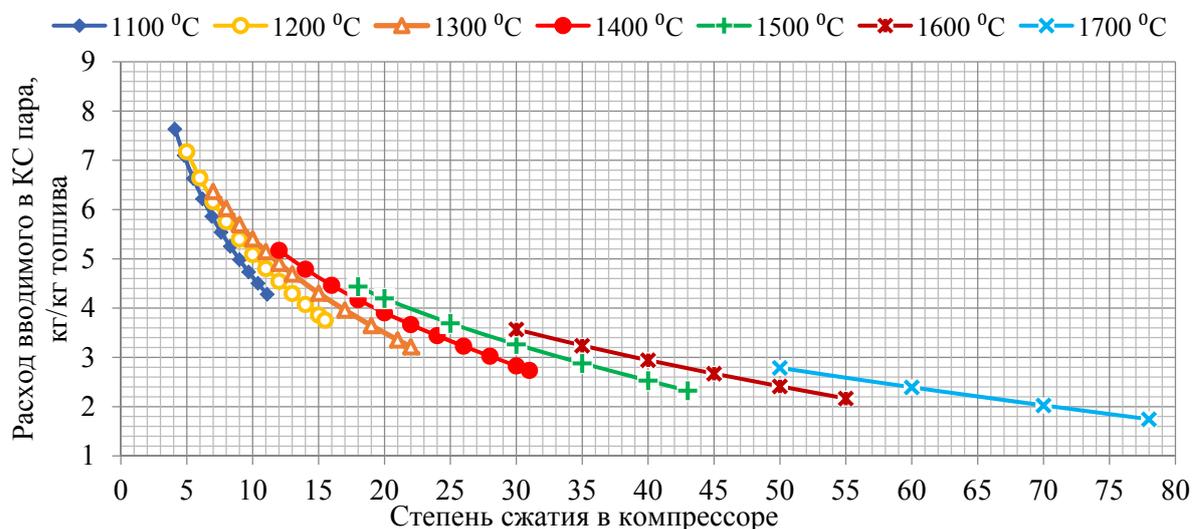


Рис. 2. Зависимость вводимого в КС расхода пара от степени сжатия в компрессоре и температуры газопаровой смеси на выходе КС

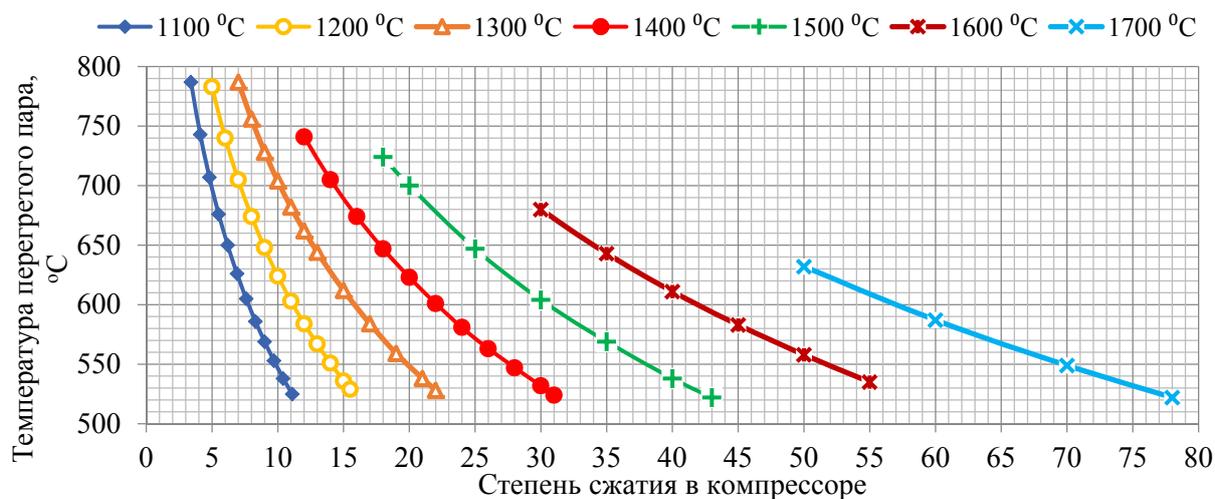


Рис. 3. Зависимость температуры пара, вводимого в КС, от степени сжатия в компрессоре и температуры газопаровой смеси на выходе КС

Рассмотрим, какие теплоутилизаторы можно использовать в КГПУ для повышения их энергоэффективности.

Теплоутилизаторы делятся на две основные группы: контактные и поверхностные. Наибольшее применение нашли контактные теплоутилизаторы с пассивной и активной насадкой. В них насадка для увеличения теплообмена орошается водой.

Контактные теплоутилизаторы с пассивной насадкой просты в изготовлении и имеют высокую тепловую эффективность. Их недостатками являются: нагрев только воды и до температуры не выше точки росы; существенное аэродинамическое сопротивление (400–1600 Па); зависимости аэродинамического сопротивления от плотности орошения; низкая скорость газов (1–2,5 м/с); загрязнение воды при контакте газами; высокий влагоунос.

Контактные теплообменники с активной насадкой (КТАН) по сравнению предыдущими имеют следующие достоинства: меньше аэродинамическое сопротивление (400–800 Па); нагреваемый теплоноситель не контактирует с греющими газами; более высокая скорость газов. К их недостаткам относятся: нагрев теплоносителя в насадке не выше температуры мокрого термометра; коэффициент использования тепла ниже, чем у теплообменников с насадкой.

Поверхностные конденсационные теплоутилизаторы в последнее время нашли широкое применение для глубокого охлаждения дымовых газов. Применение в них труб с высоким коэффициентом оребрения позволило приблизить их по эффективности к контактными теплообменникам. В теплоутилизаторах этого типа можно выделить две зоны охлаждения – сухую и мокрую. Критерием разделения служит температура точки росы в уходящих газах. На трубах, металл которых имеет температуру ниже точки росы, происходит конденсация пара, содержащегося в уходящих газах. Конденсат, в зависимости от парциального давления двуокиси углерода в дымовых газах, имеет рН ниже 7 и обладает коррозионными свойствами. Для предотвращения коррозии трубы делают из коррозионноустойчивых материалов – чугуна, нержавеющей стали, меди, а также применяют биметаллические трубы. Коэффициент теплопередачи в мокрой зоне близок к коэффициенту теплопередачи для активной насадки КТАНа, в сухой зоне он значительно ниже. Существенным достоинством поверхностных конденсационных теплоутилизаторов является то, что в них: нет системы орошения; в качестве нагреваемого теплоносителя можно использовать не только воду, но и другие вещества; теплоноситель можно нагревать до температуры близкой к температуре входящих газов, поэтому его можно использовать в Органическом цикле Ренкина для выработки электроэнергии.

Применение поверхностных конденсационных теплоутилизаторов в КППУ особенно ресурсно- и энергоэффективно в связи с тем, что уходящая газопаровая смесь содержит значительно больше пара, чем дымовые газы при обычном сжигании топлива. Поэтому из нее можно использовать значительно больше теплоты и влаги для полезного использования в цикле.

Повысить экономичность КППУ можно с помощью поверхностного конденсационного теплоутилизатора и Органического цикла Ренкина с воздушным конденсатором [10].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зысин В.А. Комбинированные и парогазовые установки и циклы. – М.; Л.: ГЭИ, 1962. – 186 с.
2. Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г. Комбинированные установки с газовыми турбинами. – Л.: Машиностроение, 1982. – 247 с.
3. Иванов А.А., Ермаков А.Н., Шляхов Р.А. О глубоком подавлении выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  в ГТУ с впрыском воды или пара // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2010. – № 3. – С. 119–128.
4. Комаров Е.М. Методы уменьшения эмиссии вредных веществ в камерах сгорания ГТД и ГТУ // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2018. – № 5. – С. 9–29.
5. Галашов Н.Н., Туболев А.А., Минор А.А., Баннова А.И. Параметрический анализ схемы газопаровой установки с помощью математической модели // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 124–135.
6. Галашов Н.Н., Туболев А.А., Минор А.А., Болдушевский Е.С. Влияние температуры впрыска пара в камеру сгорания газопаровой установки на ее энергетические характеристики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, – 2023. – Т. 334. – № 5. – С. 27–36.
7. Аронов, И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И.З. Аронов. – Изд. 2. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.
8. Efficiency of utilization of heat of moisture from exhaust gases of heat HRSG of CCGT / N. Galashov, S. Tsibulskiy, D. Melnikov, A. Kiselev, A. Gabdullina // MATEC Web of Conferences. – Tomsk, 2017. – P. 01027–01031.
9. Кудинов, А.А. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина. – М.: Машиностроение, 2011. – 374 с.
10. Галашов Н.Н., Туболев А.А., Беспалов В.В., Минор А.А., Болдушевский Е.С. Расчет параметров схемы газопаровой установки с глубокой утилизацией и отпуском теплоты // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 43–55.
11. Галашов Н.Н., Цибульский С.А. Тепловая эффективность утилизационных ПГУ тройного цикла / Н.Н. Галашов, С.А. Цибульский // Электрические станции. – 2014. – № 10(999). – С. 11–15.