

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ОКИСЛИТЕЛЯ УХОДЯЩИХ ИЗ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА ГАЗОВ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

Б.Л. ШЕЛЫГИН, А.В. МОШКАРИН, Е.С. МАЛКОВ
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Уходящие газы котлов-утилизаторов содержат большое количество кислорода. В целях повышения экономичности энергоблока рационально использовать его в качестве окислителя для сжигания дополнительного топлива.

Материалы и методы: Разработка зависимостей выполнена на основе технической документации по парогазовым установкам и расчетов котельных агрегатов.

Результаты: Определены условия сжигания топлива в камере сгорания дополнительного топлива, установлены допустимые значения относительного расхода дополнительно сжигаемого топлива. Получены многофакторные зависимости, позволяющие выполнить анализ эффективной работы газотурбинной установки.

Выводы: Полученные результаты показывают возможности использования уходящих газов котлов-утилизаторов в качестве окислителя для сжигания дополнительного топлива. Установлено, что в потоке уходящих газов можно дополнительно сжигать до 55 % топлива при коэффициенте избытка воздуха 4,0.

Ключевые слова: камера сжигания дополнительного топлива, концентрация кислорода, коэффициент избытка воздуха, относительный расход дополнительного топлива.

DETECTING USE CONDITIONS OF EXHAUSTED GASES FROM RECOVERY BOILER AS OXIDIZER FOR ADDITIONAL FUEL BURNING

B.L. SHELYGIN, A.V. MOSHKARIN, E.S. MALKOV
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Abstract

Background: Exhausted gases from heat recovery boilers contain large amounts of oxygen. In order to increase energy efficiency of a power unit they should be used as an oxidizer to burn additional fuel.

Materials and methods: Development of dependency was carried out on the basis of the technical documentation for combined-cycle gas turbine and the boilers calculation.

Results: The authors determined conditions of fuel combustion in the combustion chamber of additional fuel, set the permissible values of the relative consumption of additional fuel burned. The authors obtained multiple-factor dependence, allowing to analyze the effective operation of gas turbine.

Conclusions: The results show the possibility of using exhausted gases from heat recovery boilers as an oxidant to burn additional fuel. The authors have found out that it is possible to combust up to 55 % of the fuel additionally at the air ratio of 4.0 into the flow of exhausted gases.

Key words: combustion chamber of additional fuel, oxygen concentration, excess air ratio, relative consumption of additional fuel.

Уходящие газы котлов-утилизаторов (КУ) парогазовых установок (ПГУ) электростанций имеют температуру 95–120 °С и коэффициент избытка воздуха 3–4,5 [1, 2]. Учитывая высокое содержание кислорода в газах, в целях повышения экономичности энергоблока рационально их использование в качестве окислителя для сжигания дополнительного топлива при исключении из работы специального воздухоподогревателя.

Поэтому целесообразна оценка возможностей камеры сжигания дополнительного то-

плива (КСДТ) в зависимости от исходных данных газотурбинной установки (ГТУ) (рис. 1).

Целью работы являлось определение в зависимости от значений расходов топлива и воздуха в камеру сгорания (КС) ГТУ возможной величины дополнительного сжигаемого топлива в камере сжигания дополнительного топлива (КСДТ) и требуемого обедненных кислородом расхода утилизируемых газов. Важно знать, до какого значения можно снизить коэффициент избытка воздуха в газовом потоке по условиям воспламенения топливно-воздушной смеси в КСДТ и допустимой полноты сгорания горючих

компонентов. В исследовании в качестве топлива принят природный газ.

Анализ выполнен применительно к номинальному расходу топлива в ГТУ $B_{ГТУ}^{ном}$.

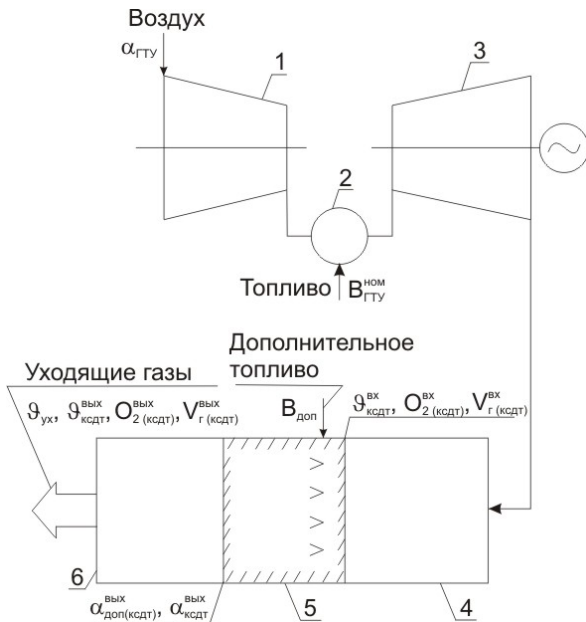


Рис. 1. Схема утилизации газов в ГТУ и использования их в качестве окислителя при сжигании дополнительного топлива: 1 – осевой компрессор (ОК); 2 – КС ГТУ; 3 – ГТУ; 4 – КУ; 5 – КСДТ; 6 – газовый подогреватель воды (ГПВ)

Расходы газов, воздуха и кислорода в них за КУ на входе в КСДТ, m^3/c , рассчитываются по формулам:

$$V_{Г(КСДТ)}^{ex} = B_{ГТУ}^{ном} [V_G^o + V^o (\alpha_{ГТУ} - 1)]; \quad (1)$$

$$V_{В(КСДТ)}^{ex} = B_{ГТУ}^{ном} V^o (\alpha_{ГТУ} - 1); \quad (2)$$

$$V_{O_2(КСДТ)}^{ex} = 0,21 B_{ГТУ}^{ном} V^o (\alpha_{ГТУ} - 1), \quad (3)$$

где $B_{ГТУ}^{ном}$, $\alpha_{ГТУ}$ – расход топлива, m^3/c , и коэффициент избытка воздуха на входе в ГТУ соответственно; V_G^o , V^o – теоретические объемы газов и воздуха соответственно, m^3/m^3 [3].

Согласно [3], $V_G^o = 1,1V^o$. Тогда концентрация кислорода в газах за КУ на входе в КСДТ, %, определяется как

$$O_{2(КСДТ)}^{ex} = \frac{V_{O_2(КСДТ)}^{ex}}{V_{Г(КСДТ)}^{ex}} \cdot 100 = \frac{21(\alpha_{ГТУ} - 1)}{1,1(\alpha_{ГТУ} - 1)}. \quad (4)$$

С увеличением коэффициента избытка воздуха на входе в ГТУ ($\alpha_{ГТУ}$) с 3,2 до 4,2 концентрация кислорода в газах на входе в КСДТ составляет 14–15,6 % (рис. 2).

Математическое описание однофакторной зависимости (4) может быть представлено в следующем виде, %:

$$O_{2(ВХ)}^{ex} = 14 + 1,57(\alpha_{ГТУ} - 3,2)^{0,8}. \quad (5)$$

Расходы кислорода, требуемого для сжигания дополнительного топлива в КСДТ, и образующихся при этом газов, m^3/c , рассчитываются как

$$V_{O_2}^{доп} = 0,21V^o \eta_{сж} B_{доп}, \quad (6)$$

$$V_G^{доп} = 1,1V^o \eta_{сж} B_{доп}, \quad (7)$$

где $\eta_{сж}$ – полнота сгорания топлива, $\eta_{сж} = 0,985$; $B_{доп}$ – расход топлива, дополнительно сжигаемого в КСДТ, m^3/c .

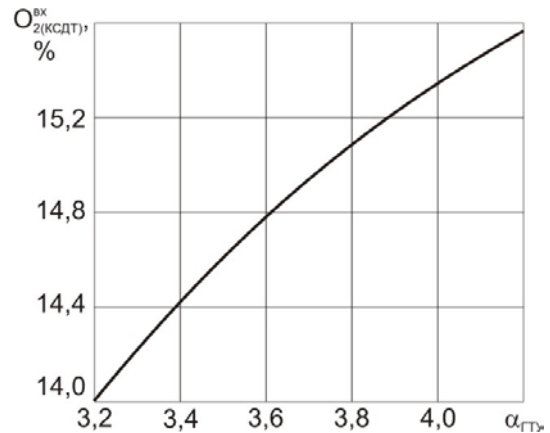


Рис. 2. Зависимость концентрации кислорода в газах на входе в КСДТ от коэффициента избытка воздуха на входе в ГТУ

Расход газов, воздуха и кислорода на выходе из КСДТ, m^3/c , определяется следующим образом:

$$V_{O_2(КСДТ)}^{вых} = V_{O_2(КСДТ)}^{ex} - V_{O_2}^{доп} = \quad (8)$$

$$= 0,21V^o [B_{ГТУ}^{ном} (\alpha_{ГТУ} - 1) - 0,985B_{доп}];$$

$$V_{В(КСДТ)}^{вых} = \frac{V_{O_2(КСДТ)}^{вых}}{0,21}; \quad (9)$$

$$V_G^{вых(КСДТ)} = V_G^{ex(КСДТ)} - \frac{V_{O_2}^{доп}}{0,21} + V_G^{доп} = \quad (10)$$

$$= V^o [B_{ГТУ}^{ном} (\alpha_{ГТУ} + 0,1) + 0,1B_{доп}].$$

Концентрация кислорода в уходящих газах за КСДТ, %, рассчитывается по формуле

$$O_{2(КСДТ)}^{вых} = \frac{V_{O_2(КСДТ)}^{вых}}{V_G^{вых(КСДТ)}} = \frac{21[(\alpha_{ГТУ} - 1) - 0,985 \frac{B_{доп}}{B_{ГТУ}^{ном}}]}{\alpha_{ГТУ} + 0,1 + 0,1 \frac{B_{доп}}{B_{ГТУ}^{ном}}}. \quad (11)$$

Независимо от мощности ГТУ, расхода сжигаемого в ней топлива $B_{ГТУ}^{ном}$ и количества подаваемого воздуха в КС, с увеличением дополнительно сжигаемого в КСДТ топлива $B_{доп}$ требуется более высокий расход окислителя (рис. 3). При повышении расхода требуемого кислорода его концентрация на выходе из КСДТ снижается. Так, при $\alpha_{ГТУ} = 4,0$ и увеличении относительного расхода $B_{доп}/B_{ГТУ}^{ном}$ от 0 до 0,3 значение $O_{2(КСДТ)}^{вых}$ снижается с 15,33 до 14 %. В случае пониженной величины $\alpha_{ГТУ} = 3,2$ соответствующее снижение $O_{2(КСДТ)}^{вых}$ более существенно (на 2,1 %).

Согласно [2], для ПГУ с КУ, по условию устойчивости воспламенения топливно-

воздушной смеси и нормальной полноте сгорания природного газа, концентрация кислорода в газовом потоке должна быть не менее 12 % при коэффициенте избытка воздуха 2,0.

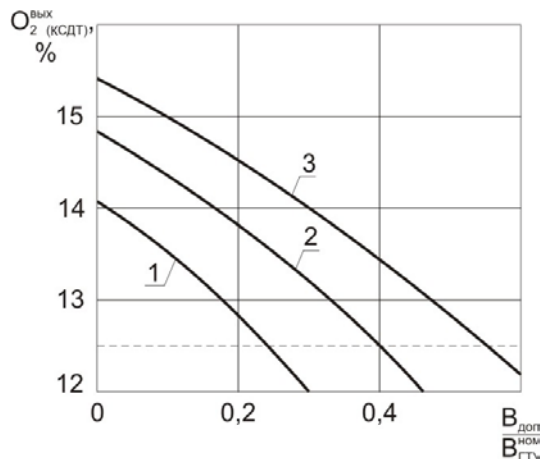


Рис. 3. Зависимость концентрации кислорода в газах на выходе из КСДТ от относительного расхода дополнительно сжигаемого топлива при различных значениях коэффициента избытка воздуха на входе в ГТУ ($\alpha_{ГТУ}$): 1 – 3,2; 2 – 3,6; 3 – 4,0

В случае принятого допустимого значения $O_{2(КСДТ)}^{в\text{ых}} = 12,5 \%$ возможное отношение $V_{доп} / V_{ГТУ}^{ном}$ при $\alpha_{ГТУ} = 4,0$ составляет 0,55. При снижении $\alpha_{ГТУ}$ до 3,2 эта величина не превышает 0,24.

Математическое описание зависимости (11) от определяющих факторов представляется в виде, %

$$O_{2(КСДТ)}^{в\text{ых}} = K_1 - K_2 \left(\frac{V_{доп}}{V_{ГТУ}^{ном}} \right)^{1,15}, \quad (12)$$

$$\text{где } K_1 = 14,05 + 1,59(\alpha_{ГТУ} - 3,2)^{0,83};$$

$$K_2 = 7,84 - 2,74(\alpha_{ГТУ} - 3,2)^{0,9}.$$

После преобразования уравнения (11) зависимость относительного расхода дополнительно сжигаемого в КСДТ топлива (рис. 4) принимает вид

$$\frac{V_{доп}}{V_{ГТУ}^{ном}} = \frac{21(\alpha_{ГТУ} - 1) - O_{2(КСДТ)}^{в\text{ых}}(\alpha_{ГТУ} + 0,1)}{20,65 + 0,1O_{2(КСДТ)}^{в\text{ых}}}. \quad (13)$$

Изменение относительного расхода топлива в зависимости от определяющих факторов представляется в виде

$$\frac{V_{доп}}{V_{ГТУ}^{ном}} = K_3 + K_4(\alpha_{ГТУ} - 3,2), \quad (14)$$

$$\text{где } K_3 = 0,23 - 0,155(O_{2(КСДТ)}^{в\text{ых}} - 12,5);$$

$$K_4 = 0,385 - 0,04(O_{2(КСДТ)}^{в\text{ых}} - 12,5).$$

Для ГТУ с увеличением $\alpha_{ГТУ}$ от 3,2 до 4,0 при расходе кислорода уходящих газов в случаях снижения концентрации $O_{2(КСДТ)}^{в\text{ых}}$ до значений 12,5–13,5 % относительный расход топ-

лива в КСДТ может достигать $V_{доп} / V_{ГТУ}^{ном} = 0,32-0,54$ (рис. 4).

Дальнейшее увеличение расхода топлива в КСДТ при пониженных значениях $O_{2(КСДТ)}^{в\text{ых}}$ (менее 12,5 %) невозможно из-за ухудшения устойчивости воспламенения топливно-воздушной смеси и снижения полноты сгорания веществ.

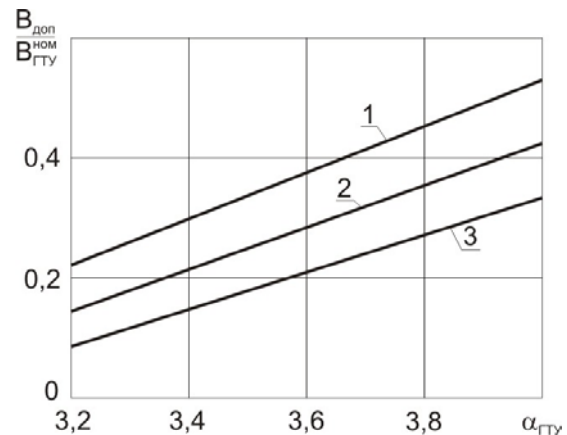


Рис. 4. Зависимость доли дополнительно сжигаемого природного газа в КСДТ от коэффициента избытка воздуха на входе в ГТУ при различных значениях концентрации кислорода в газах за КСДТ $O_{2(КСДТ)}^{в\text{ых}}$: 1 – 12,5 %; 2 – 13 %; 3 – 13,5 %

Применительно к современным ГТУ, при $\alpha_{ГТУ} = 3,5-3,8$ и допустимой величине $O_{2(КСДТ)}^{в\text{ых}} = 12,5 \%$ предельное значение относительного расхода топлива $V_{доп} / V_{ГТУ}^{ном}$ может достигать 0,33–0,44.

С использованием уравнений (6), (8) и (9) коэффициент избытка воздуха за КСДТ по отношению к дополнительно сжигаемому топливу рассчитывается по формуле

$$\alpha_{доп(КСДТ)}^{в\text{ых}} = \frac{V_{B(КСДТ)}^{в\text{ых}}}{\eta_{сз} V^o V_{доп}} = 1,015 \frac{V_{ГТУ}^{ном}}{V_{доп}} (\alpha_{ГТУ} - 1) - 1. \quad (15)$$

При неизменной мощности ГТУ (при постоянных расходах топлива $V_{ГТУ}^{ном}$ и воздуха в КС) с увеличением расхода дополнительно сжигаемого топлива $V_{доп}$ в КСДТ возрастает расход кислорода газов на его окисление. Поэтому, независимо от значений $\alpha_{ГТУ}$, величина коэффициента избытка воздуха на выходе из КСДТ снижается согласно зависимости (рис. 5)

$$\alpha_{доп(КСДТ)}^{в\text{ых}} = K_5 - K_6 \left(\frac{V_{доп}}{V_{ГТУ}^{ном}} - 0,2 \right)^{0,8}, \quad (16)$$

$$\text{где } K_5 = 5 \alpha_{ГТУ} - 5,3; K_6 = 13,6 + 7,38(\alpha_{ГТУ} - 3,2).$$

В случаях повышения $V_{доп} / V_{ГТУ}^{ном}$ от 0,2 до 0,5 для диапазона $\alpha_{ГТУ} = 3,2-4,0$ значение $\alpha_{(КСДТ)}^{в\text{ых}}$ снижается до 3,5–5,3.

Коэффициент избытка воздуха за КСДТ по отношению к общему расходу топлива $V_{ГТУ}^{НОМ}$ и $V_{доп}$ рассчитывается следующим образом:

$$\alpha_{(КСДТ)}^{вых} = \frac{V_{В(КСДТ)}^{вых}}{V_{В(КСДТ)}^{доп+ГТУ}} = \frac{\alpha_{ГТУ}}{1 + 0,985 \frac{V_{доп}}{V_{ГТУ}^{НОМ}}} - 1. \quad (17)$$

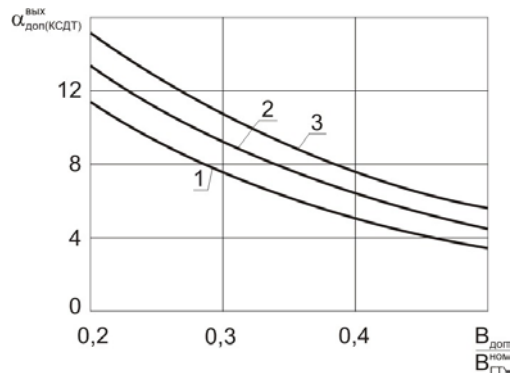


Рис. 5. Зависимость коэффициента избытка воздуха за КСДТ применительно к дополнительно сжигаемому топливу от его относительного расхода при различных коэффициентах избытка воздуха на входе в ГТУ ($\alpha_{ГТУ}$): 1 – 3,2; 2 – 3,6; 3 – 4,0

Применительно к общему расходу топлива ($V_{доп} + V_{ГТУ}^{НОМ}$) значение $\alpha_{(КСДТ)}^{вых}$ снижается до 1,15–1,63 (рис. 6). Таким образом, при отношении $V_{доп} / V_{ГТУ}^{НОМ}$ выше 0,35 количество расходуемого окислителя практически полностью израсходовано.

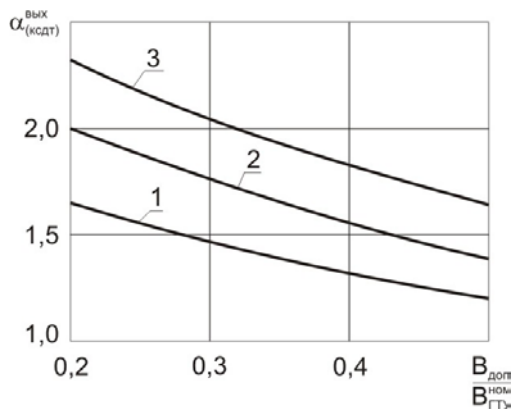


Рис. 6. Зависимость коэффициента избытка воздуха за КСДТ от относительного расхода топлива при различных коэффициентах избытка воздуха на входе в ГТУ ($\alpha_{ГТУ}$): 1 – 3,2; 2 – 3,6; 3 – 4,0

Шельгин Борис Леонидович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», кандидат технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 41-60-56, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Мошкарин Андрей Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», Заслуженный деятель науки Российской Федерации, Почетный работник высшего профессионального образования России, доктор технических наук, профессор

Применительно к расходу дополнительно сжигаемого топлива с увеличением $V_{доп} / V_{ГТУ}^{НОМ}$ значение $\alpha_{(КСДТ)}^{вых}$ снижается согласно зависимости

$$\alpha_{(КСДТ)}^{вых} = K_7 - K_8 \left(\frac{V_{доп}}{V_{ГТУ}^{НОМ}} - 0,2 \right)^{0,9}, \quad (18)$$

где $K_7 = 1,68 + 0,79(\alpha_{ГТУ} - 3,2)$;

$$K_8 = 1,65 + 0,53(\alpha_{ГТУ} - 3,2)^{0,45}.$$

Список литературы

1. Анализ направлений развития отечественной теплоэнергетики / А.В. Мошкарин, М.А. Девочкин, Б.Л. Шельгин, В.С. Рабенко; под ред. А.В. Мошкарин / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002. – 256 с.
2. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций / под ред. С.В. Цанева. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 574 с.
3. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубовского, Э.С. Красиной. – М.: Энергия, 1973.
4. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1984.

References

1. Moshkarin, A.V., Devochkin, M.A., Shelygin, B.L., Rabenko, V.S. *Analiz napravleniy razvitiya otechestvennoy teploenergetiki* [Analysis of Development Lines of Russian Heat Power Engineering], Ivanovo, 2002, 256 p.
2. Tsanev, S.V. *Gazoturbinnye i parogazovye ustanovki teplovykh elektrostantsiy* [Gas Turbine and Combined-cycle Gas Turbine Thermal Power Plants], Moscow: izdatel'stvo MEI, 2002, 574 p.
3. Kuznetsov, N.V., Mitora, V.V., Dubovskiy, I.E., Krasina, E.S. *Teplovoy raschet kotel'nykh agregatov (normativnyy metod)* [Thermal Calculation for Boilers (normative method)], Moscow: Energiya, 1973.
4. Pchelkin, Yu.M. *Kamery sgoraniya gazoturbinnnykh dvigateley* [Combustion Chambers of Gas Turbine Engines], Moscow: Mashinostroenie, 1984.

Малков Евгений Сергеевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,
аспирант, инженер кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефон (4932) 41-60-56,
e-mail: admin@tes.ispu.ru