

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паньков И.А., Фролов В.Я. Повышение качества электроэнергии в автономных электроэнергетических системах // Записки Горного института. – 2017. – Т. 227. – С. 563–568.
2. Зайченко В.М., Чернявский А.А. Автономные системы энергоснабжения. – М.: НЕДРА, 2015. – С. 285.
3. Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф. Обоснование рациональных вариантов энерго-, топливоснабжения децентрализованных потребителей региона: методический подход, результаты исследований // Энергетическая политика. – 2011. – № 4. – С. 42–49.
4. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Халгаева Н.А. Влияние природных и стоимостных факторов на выбор оптимальной мощности ветроэлектростанции в составе ветродизельного комплекса на Востоке РФ // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2016. – № 19–20. – С. 21–28.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПОВЕРХНОСТНОГО ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА

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

*Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова*

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

Контактные газопаровые установки (КГПУ) с вводом пара в камеру сгорания (КС) позволяют существенно повысить мощность и КПД цикла [1, 2], а также снизить выбросы вредных веществ [3].

Расчеты, выполненные с помощью программы расчета тепловых схем КГПУ [4, 5], показали, что ввод пара в КС позволяет повысить электрический КПД до 53–57 %.

Главный недостаток КГПУ – большие потери пара с уходящими газами и загрязнение окружающей среды паром.

Для уменьшения потерь теплоты и пара с уходящими газами на выходе котла-утилизатора устанавливаются конденсационные теплоутилизаторы. Теоретические вопросы применения теплоутилизаторов рассмотрены в [6–8].

Теплоутилизаторы делятся на контактные и поверхностные. В работе [9] рассмотрено применение контактного теплоутилизатора с активной насадкой для отпуска теплоты в системе теплоснабжения.

Главным недостатком контактных теплоутилизаторов является нагрев теплоносителя в насадке не выше температуры мокрого термометра.

Более подходят для утилизации теплоты и пара, а также глубокого охлаждения дымовых газов в схемах КГПУ поверхностные теплоутилизаторы. В теплоутилизаторах этого типа можно выделить две зоны охлаждения – сухую и мокрую. Критерием разделения на зоны служит температура точки росы. Поверхностные теплоутилизаторы позволяют нагревать не только воду, но и низкокипящие вещества до температуры близкой к температуре входящих в них газов, что позволяет использовать их в Органическом цикле Ренкина для дополнительной выработки электроэнергии [10].

Применение поверхностных теплоутилизаторов в КГПУ особенно энергоэффективно в связи с тем, что уходящая газопаровая смесь содержит значительно больше пара, чем дымовые газы при традиционном сжигании топлива. Поэтому из нее можно полезно использовать значительно больше теплоты и влаги.

Ниже приведен алгоритм расчета поверхностного теплоутилизатора на выходе котла-утилизатора КГПУ.

Сначала приведены постоянные величины, используемые в расчете.

Плотности при нормальных условиях:

- $\rho_{0ПГ} = 0,725 \text{ кг/м}^3$ – природного газа;
- $\rho_{0Н2О} = 0,804 \text{ кг/м}^3$ – водяного пара;
- $\rho_{0СО2} = 1,977 \text{ кг/м}^3$ – диоксида углерода;
- $\rho_{0N2} = 1,25 \text{ кг/м}^3$ – азота;
- $\rho_{0в} = 1,293 \text{ кг/м}^3$ – воздуха.

Молекулярные массы:

- $\mu_{в} = 28,96 \text{ г/моль}$ – воздуха;
- $\mu_{N2} = 28,013 \text{ г/моль}$ – азота;
- $\mu_{СО2} = 44,01 \text{ г/моль}$ – диоксида углерода;
- $\mu_{Н2О} = 18,016 \text{ г/моль}$ – водяного пара.

Удельные изобарные массовые теплоемкости:

- $C_{СО2} = 0,8658 \text{ кДж/(кг·К)}$ – диоксида углерода;
- $C_{N2} = 1,0316 \text{ кДж/(кг·К)}$ – азота;
- $C_{Н2О} = 1,968 \text{ кДж/(кг·К)}$ – водяного пара;
- $C_{в} = 1,005 \text{ кДж/(кг·К)}$ – воздуха;
- $C_{к} = 4,19 \text{ кДж/(кг·К)}$ – конденсата;
- $\eta_{то} = 0,99$ – КПД теплообменника.

Исходные данные:

- $V_{ПГ}$ – расход природного газа, $\text{м}^3/\text{с}$;
- $\text{СН}_4, \text{С}_2\text{Н}_6$, и т. д. – состав природного газа в %;
- $P_{СТ}$ – статическое давление ПГС в теплоутилизаторе, Па;
- $t_{1ПГС}$ – температура ПГС на входе теплоутилизатора, $^{\circ}\text{C}$;
- $t_{2ПГС}$ – температура ПГС на выходе теплоутилизатора, $^{\circ}\text{C}$;
- $t_{1Т}$ – температура теплоносителя на входе теплоутилизатора, $^{\circ}\text{C}$;
- $\Delta t_{Т}$ – недогрев теплоносителя до $t_{1ПГС}$, $^{\circ}\text{C}$;
- $C_{Т}$ – теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг·К) ;
- α – коэффициент избытка воздуха;
- d – относительный расход пара, добавленный в ПГС, кг/кг топлива;
- $d_{ПГ}$ – влагосодержание природного газа, кг/кг топлива.

Расчет воздуха, топлива и продуктов сгорания производится по формулам [11].

Теоретическое количество сухого воздуха, необходимое для сжигания 1 м^3 сухого природного газа

$$V_{в}^0 = 0,0476[0,5\text{CO}+0,5\text{H}_2+1,5\text{H}_2\text{S}+\Sigma(m+n/4)\text{C}_m\text{H}_n-\text{O}_2], \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (1)$$

Продукты сгорания 1 м^3 сухого природного газа.

Теоретический объем азота

$$V_{N2}^0 = 0,79V_{в}^0 + N_2/100, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2)$$

Теоретический объем диоксида углерода

$$V_{СО2}^0 = 0,01[\text{CO}_2+\text{CO}+\text{H}_2\text{S}+\Sigma m\text{C}_m\text{H}_n], \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (3)$$

Теоретический объем водяных паров

$$V_{Н2О}^0 = 0,01[\text{H}_2\text{S}+\text{H}_2+0,5\Sigma n\text{C}_m\text{H}_n+0,124d_{ПГ}]+0,016V_{в}^0, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (4)$$

Объем сухих продуктов сгорания

$$V_{СТ}^0 = V_{N2}^0 + V_{СО2}^0 + (\alpha-1) \cdot V_{в}^0, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (5)$$

Объем добавленного водяного пара

$$V_d = d \cdot \rho_{ПГ}/\rho_{Н2О}, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (6)$$

Объем водяных паров

$$V_{Н2О} = V_{Н2О}^0 + 0,016(\alpha-1) \cdot V_{в}^0 + V_d, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (7)$$

Суммарный объем влажных продуктов сгорания

$$V = V_{\text{СГ}} + V_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (8)$$

Объемная доля диоксида углерода

$$r_{\text{CO}_2} = V^0_{\text{CO}_2}/V. \quad (9)$$

Объемная доля азота

$$r_{\text{N}_2} = V^0_{\text{N}_2}/V. \quad (10)$$

Объемная доля добавленного водяного пара

$$r_d = V_d/V. \quad (11)$$

Объемная доля водяного пара

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}/V. \quad (12)$$

Объемная доля воздуха

$$r_b = (\alpha - 1) \cdot V^0_b / V. \quad (13)$$

Парциальное давление водяного пара

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = r_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P_{\text{СГ}}, \text{ Па}. \quad (14)$$

Температура точки росы определяется как функция от $P_{\text{H}_2\text{O}}$ в состоянии насыщения

$$t_p = P_s(P_{\text{H}_2\text{O}}), \text{ }^\circ\text{C}. \quad (15)$$

Температура точки росы разделяет теплоутилизатор на сухую и мокрую зоны.

Массовый расход сухих дымовых газов на 1 м³ топлива

$$m_{\text{СГ}} = V_{\text{RO}_2} \cdot \rho_{\text{RO}_2} + V^0_{\text{N}_2} \cdot \rho_{\text{N}_2} + V^0_b \cdot \rho_{\text{O}_2} \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0_b, \text{ кг/м}^3. \quad (16)$$

Массовый расход добавленного водяного пара на 1 м³ топлива

$$m_d = V_d \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ кг/м}^3. \quad (17)$$

Массовый расход водяного пара на 1 м³ топлива

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}} / \rho_{\text{0ПГ}}, \text{ кг/м}^3. \quad (18)$$

Массовый расход дымовых газов на 1 м³ топлива

$$m_{\text{ГПС}} = m_{\text{СГ}} + m_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ кг/м}^3. \quad (19)$$

Влагосодержание дымовых газов на входе теплоутилизатора

$$d_{\text{1ГПС}} = m_{\text{H}_2\text{O}} / m_{\text{СГ}}, \text{ кг/кг}. \quad (20)$$

Влагосодержание насыщенных продуктов сгорания на выходе теплоутилизатора

$$d_{\text{2ГПС}} = \frac{0,0006382 + 0,004\alpha}{\alpha + 0,199} \exp(0,062t_{\text{2ГПС}}), \text{ кг/кг}. \quad (21)$$

Массовый расход сухих дымовых газов

$$G_{\text{СГ}} = m_{\text{СГ}} \cdot V_{\text{ПГ}}, \text{ кг/с}. \quad (22)$$

Массовый расход дымовых газов

$$G_{\text{ГПС}} = m_{\text{ГПС}} \cdot V_{\text{ПГ}}, \text{ кг/с}. \quad (23)$$

Массовый расход добавленного водяного пара

$$G_d = m_d \cdot V_{\text{ПГ}}, \text{ кг/с}. \quad (24)$$

Массовый расход конденсата

$$G_k = G_{\text{СГ}} \cdot (d_{\text{1ГПС}} - d_{\text{2ГПС}}), \text{ кг/с}. \quad (25)$$

Массовый расход избытка конденсата по отношению к добавленному пару

$$\Delta G_k = G_k - G_d, \text{ кг/с}. \quad (26)$$

Сумма произведений $\mu_i \cdot r_i$

$$\mu_\Sigma = \mu_b \cdot r_b + \mu_{\text{N}_2} \cdot r_{\text{N}_2} + \mu_{\text{CO}_2} \cdot r_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{H}_2\text{O}} \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (27)$$

Массовая доля воздуха

$$g_b = r_b \cdot \mu_b / \mu_\Sigma. \quad (28)$$

Массовая доля азота

$$g_{\text{N}_2} = r_{\text{N}_2} \cdot \mu_{\text{N}_2} / \mu_\Sigma. \quad (29)$$

Массовая доля диоксида углерода

$$g_{\text{CO}_2} = r_{\text{CO}_2} \cdot \mu_{\text{CO}_2} / \mu_\Sigma. \quad (30)$$

Массовая доля водяного пара

$$g_{H_2O} = r_{H_2O} \cdot \mu_{H_2O} / \mu_{\Sigma} \quad (31)$$

Массовая теплоемкость дымовых газов

$$C_{ГПС} = C_v \cdot g_v + C_{CO_2} \cdot g_{CO_2} + C_{N_2} \cdot g_{N_2} + C_{H_2O} \cdot g_{H_2O}, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \quad (32)$$

Удельная теплота парообразования при давлении P_{H_2O}

$$r = f(P_{H_2O}), \text{ кДж}/\text{кг}. \quad (33)$$

Теплота, отданная газами и конденсатом в теплоутилизаторе,

$$Q_{УТ} = G_{ГПС} \cdot C_{ГПС} \cdot (t_{1ГПС} - t_{2ГПС}) + G_k \cdot r, \text{ кВт}. \quad (34)$$

Теплота, отданная газами в сухой зоне теплоутилизатора,

$$Q_{СУХ} = G_{ГПС} \cdot C_{ГПС} \cdot (t_{1ГПС} - t_p), \text{ кВт}. \quad (35)$$

Теплота, отданная газами в мокрой зоне теплоутилизатора,

$$Q_{МОК} = Q_{ГПС} - Q_{СУХ}, \text{ кВт}. \quad (36)$$

Расход нагреваемого теплоносителя

$$G_T = Q_{ГПС} \cdot \eta_{то} / [C_T \cdot (t_{1ГПС} - \Delta t_T - t_{1Т})], \text{ кг}/\text{с}. \quad (37)$$

Представленный алгоритм реализован в программе электронной таблицы excel и используется для исследования тепловых схем КГПУ с утилизацией низкопотенциальной теплоты уходящих газов.

На рис. 1 приведен пример расчета по программе теплоутилизатора на следующие исходные данные: $V_{ПГ} = 1 \text{ м}^3/\text{с}$; объемный состав топлива в %: $\text{CH}_4 = 98,72$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,12$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,01$; $\text{CO}_2 = 0,14$; $\text{N}_2 = 1$; $P_{СТ} = 104,4 \text{ кПа}$; $t_{1ГПС} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{2ГПС} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{1Т} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta t_T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$; $C_T = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\alpha = 1,3$. Видим, что при изменении ввода пара от 0 до 10 кг/кг топлива $Q_{УТ}$ линейно возрастает от 3,8 до 22 МВт, при этом основная доля приходится на мокрую часть, от 2,8 до 21 МВт. Расход конденсата изменяется от 1,05 до 8,3 кг/с. Во всем диапазоне избыток конденсата по отношению к введенному пару составляет 1,05 кг/с. Расход нагреваемой от 20 до 100 °С воды в теплоутилизаторе изменяется от 11,3 до 65 кг/с в зависимости от расхода ввода пара.

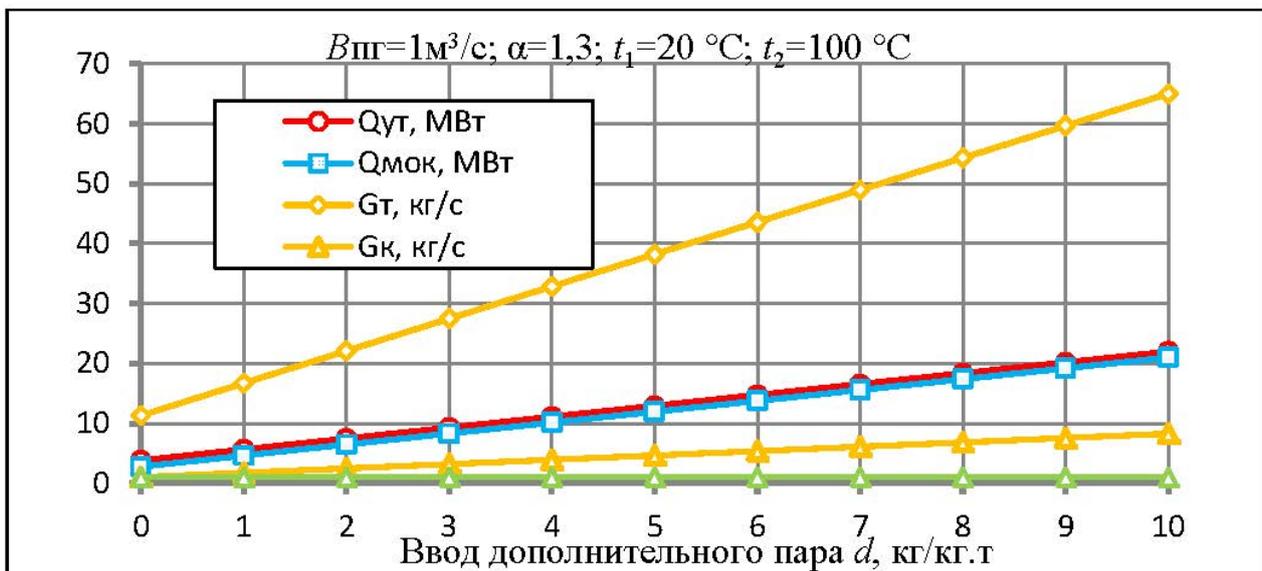


Рис. 1. Результаты расчета теплоутилизатора

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зысин В.А. Комбинированные и парогазовые установки и циклы. – М.; Л.: ГЭИ, 1962. – 186 с.
2. Арсенев 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 NO_x и CO в ГТУ с впрыском воды или пара // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2010. – № 3. – С. 119–128.

4. 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.
5. 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.
6. Аронов, И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И.З. Аронов. – Изд. 2. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.
7. 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 // МАТЕС Web of Conferences. – Tomsk, 2017. – P. 01027–01031.
8. Кудинов А.А. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина. – М.: Машиностроение, 2011. – 374 с.
9. 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.
10. 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.
11. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). 3-е изд., перераб. и дополн. – СПб: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 257 с.

NANOMATERIALS COMPOSED OF AG-MODIFIED G-C₃N₄ FOR USE IN ENERGY AND ENVIRONMENTAL APPLICATIONS

I.V. Maltseva, I.S. Smirnov, D.Yu. Piarnits

*Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies,
Mechanics and Optics, megafaculty of life sciences, Infochemistry Scientific Center, group 03243*

Supervisor: Ekaterina V. Skorb, professor Dr.

Nowadays environmental applications, particularly energy saving, energy efficiency are crucial concepts in our modern world, aiming to reduce the consumption of energy resources while maintaining or even improving the quality of life. One of the global goals is to improve the technology by obtaining and developing new materials by technological advances and improved processes [9].

Currently, one of the most relevant areas of materials science in the field of hydrogen energy, wastewater and gas treatment is researches connected with graphitic carbon nitride (g-C₃N₄). g-C₃N₄ is known as an appropriate material for photocatalysts based on its suitable energy band structure (2.78–2.83 eV), visible light absorption and high stability. Prevalent methods of pristine g-C₃N₄ synthesis are based on low-cost nitrogen-rich organic precursors, such as urea, melamine and dicyandiamide, etc. [3–5]. Nevertheless, the practical use of pristine g-C₃N₄ has been hindered by various drawbacks such as a small surface area and the quick recombination of electron-hole pairs generated by light. (e⁻-h⁺) pairs [2, 7]. In this research we used melamine barbiturate (MB) as another nitrogen-containing precursor for g-C₃N₄ (CN-MB) synthesis due to its precise characteristics. The choice is justified by numerous works reporting extraordinary properties in modified barbiturates [6], such as light-sensitive swelling of self-assemblies [8], changing colour or various biological applications.

In this work the sample CN-MB was obtained by thermal polymerization using 2 g of melamine and barbituric acid compounds. For this, the respective amounts of substances (1 gram of barbituric acid and 1.015 g of melamine) were taken in a 1:1 molar ratio. Each substance was dissolved in 500 ml of water (with poor dissolution of the substance, the solution was heated to 40 °C). On the next step, the solutions were placed into the refrigerator for 30 minutes until 5 °C, then drained into