

УДК 621.184.004

И.А. Редько<sup>1</sup>, А.А. Редько<sup>2</sup>, А.В. Давиденко<sup>2</sup><sup>1</sup>Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, Харьков<sup>2</sup>Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОПОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПАРОВЫХ ВОДОТРУБНЫХ КОТЛАХ

Приведены результаты анализа процессов сжигания газообразного топлива в топке водотрубного парового котла типа ДКВр. Определены термодинамические параметры реакции горения метана – изменение энтальпии и энтропии при различных условиях охлаждения продуктов реакции. Выполнен эксергетический анализ рабочих процессов в топке парового котла.

**Ключевые слова:** реакция горения, топочные процессы, энтальпия, энтропия, эксергия, эксергетический КПД.

### Состояние проблемы

Повышение эффективности эксплуатации котельных агрегатов и решение задач энергосбережения при сжигании газообразного топлива возможно путем математического моделирования рабочих процессов в топках котельных агрегатов [1-4]. Компьютерное моделирование и использование численных методов исследования процессов сжигания газа, аэродинамических и теплообменных процессов является эффективным и менее затратным.

Применение различных методов интенсификации теплообмена, сжигания топлива, изменение конструктивных параметров горелочных устройств оценить инженерными методиками не представляется возможным. Нормативный метод и другие инженерные методики являются приближенными. Методики расчета процессов сжигания твердых и газообразных топлив приведены в работах [2, 5-7]. Однако, при расчете топок определение адиабатной (максимальной) температуры горения топлива, расчет распределения температуры по глубине топки и уходящих из топки продуктов сгорания, плотность теплового потока по экранной поверхности определяются приближенно.

Термодинамические методы анализа тепловых процессов [7-10] позволяют оценить их эффективность, но влияние конструктивных параметров горелочных устройств, аэродинамических характеристик топок они не учитывают.

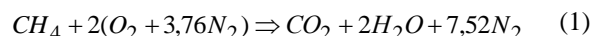
Поэтому применение методов термодинамики стационарных и неравновесных процессов позволяет получить более полное описание рабочих высокотемпературных процессов в топках паровых котлов [7-11].

Целью работы является исследование термодинамических параметров топок паровых котлов, влияющих на их эффективность.

### Объект и методика исследований

Исследован вертикально-водотрубный газомазутный котел ДЕ-10-14ГМ с горелочным устройством ГМГ-7, предназначенный для производства насыщенного и слабо перегретого пара с температурой 225°C с абсолютным давлением 14 кгс/см<sup>2</sup>, номинальной производительностью 10 т/ч.

Сжигание природного газа (метана) происходит согласно уравнения:



При сжигании метана выделяется теплота:

$$\Delta H^0 = H_z - H_p \quad (2)$$

$$\Delta H^0 = h_{CH_4}^0 - [h_{CO_2}^0 + 2h_{H_2O}^0] \quad (3)$$

Энтропия исходных компонентов и продуктов реакции определяется по уравнениям:

$$S_z = S_{CH_4}^0 + 2(S_{O_2}^0 + 3,76 \cdot S_{N_2}^0)_{298K} \quad (4)$$

$$S_p = (S_{CO_2} + 2 \cdot S_{H_2O} + 7,52 \cdot S_{N_2})_{1300K} \quad (5)$$

Температура продуктов сгорания на выходе из топки равна 1300 К.

Изменение энтропии в процессе теплообмена продуктов сгорания с тепловоспринимающими поверхностями

$$\Delta S_\Sigma = \int_0^{F_\Sigma} \frac{q_i^\Sigma}{T_{CT,i}} dF \quad (6)$$

$$q_i = \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) - \text{плотность суммарного теплового}$$

потока через  $i$ -ю тепловоспринимающую поверхность топки;  $F_{\Sigma}$  – суммарная площадь тепловоспринимающей поверхности.

Изменение эксергии в процессе сжигания метана определяется по уравнению:

$$B_2 - B_p = (H_2 - T_0 \cdot S_2) - (H_p - T_0 \cdot S_p) \quad (7)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды, принимается  $T_0=298K$ .

Уравнение баланса эксергии в системе:

$$\Delta E_{сист} = E_{топки} + E_{воды} - E_Q - E_{пар} \quad (8)$$

Удельная энергия потока питательной воды на входе в топку котла:

$$e_{воды} = (h^{in} - h_0) - T_0(S^{in} - S_0) \quad (9)$$

Полная эксергия потока питательной воды на входе в топку:

$$E_{воды} = m_{воды} \cdot e_{воды} \quad (10)$$

Удельная эксергия потока пара на выходе из котла:

$$e_{пара} = (h_{пар}^{out} - h_{воды}^0) - T_0(S_{пар}^{out} - S_{пар}^0) \quad (11)$$

Полная эксергия потока пара:

$$E_{пар} = m_{пар} \cdot e_{пар} \quad (12)$$

принимается, что  $m_{вода} = m_{пар}$ .

Потери эксергии при теплообмене продуктов сгорания с поверхностями топки котла определяли методом математического моделирования [5-7].

$$E_Q = T_0 \cdot \sum_i \frac{Q_i}{T} = T_0 \cdot \sum_i S_i \quad (13)$$

Потери эксергии при сгорании топлива:

$$E_2 = m_2 \cdot B_2 = m_2 \cdot (H_2 - T_0 \cdot S_2)_{298K} \quad (14)$$

Эксергия уходящих газов:

$$E_p = m_p \cdot B_p = m_p \cdot (H_p - T_0 \cdot S_p)_{t_{yx}} \quad (15)$$

$$\Delta E_{хим.реак.} = E_2 - E_p \quad (16)$$

### Основные результаты

Расчеты выполнены для парового водотрубного котла ДКВр – 10/14, паропроизводительностью 10 т/ч.

На рис. 1 показана расчетная схема материальных и тепловых потоков парового котла.

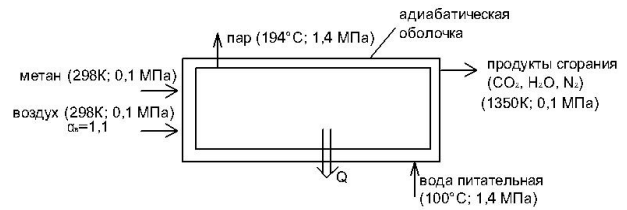


Рис.1 Расчетная схема парового котла

1. Эксергия топлива (метана) в процессе химического перехода в продукты сгорания:

Удельная эксергия топлива определяется согласно (6):

$$B_T = h_m - T_0 S_m = -\frac{74,8}{16} - 298 \cdot 2,8 = -839 \text{кДж / кг}$$

$$h_m = h_{CH_4}^0 = -74,8 \text{кДж / моль [7].}$$

значение  $h_T$  определяется по табл. [12].

$S_T$  – определяется по результатам численного моделирования.

Эксергия топлива:

$$E_T = m_2 \cdot e_2 = (760 / (3600 \cdot 0,75)) \cdot (-839) = -236 \text{кВт}$$

2. Удельная эксергия продуктов сгорания:

$$B_p = h_p - T_0 S_p = \left( -\frac{1040}{16} - 298 \cdot 1,9 \right)_{1350K} = -635 \text{кДж / кг}$$

$$h_p = h_{CO_2}^0 + 2h_{H_2O}^0 \quad [5-7, 12].$$

Эксергия продуктов сгорания:

$$E_{пр.сг.} = m_{пр.сг.} \cdot B_p = \frac{m_{пр.сг.}}{m_{CH_4}} \cdot B_p = -8383 \text{кВт}$$

3. Эксергия питательной воды на входе в топку [12]:

$$h_0 (1 \text{ ата}, 25^\circ\text{C}) = 25 \text{ ккал/кг} (105 \text{ кДж/кг});$$

$$S_0 (1 \text{ ата}, 25^\circ\text{C}) = 0,0877 \text{ ккал/(кг}\cdot\text{K)} (0,368 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)});$$

$$h^{ex}(1,4 \text{ МПа}, 100^\circ\text{C}) = 100,3 \text{ ккал/кг} (420 \text{ кДж/кг});$$

$$S^{ex}(1,4 \text{ МПа}, 100^\circ\text{C}) = 0,31187 \text{ ккал/(кг}\cdot\text{K)} (1,31 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}).$$

Удельная эксергия питательной воды:

$$e_{воды} = (h^{ex} - h_0) - T_0(S^{ex} - S^0) = (420 - 105) - 298(1,31 - 0,37) = 35 \text{кДж / кг}$$

Полная эксергия воды:

$$E_e = m_e \cdot e_e = 2,78 \cdot 35 = 97,3 \text{кВт}$$

4. Эксергия пара на выходе из топки [12]:

$$h^{вых}(1,4 \text{ МПа}, 194^\circ\text{C}) = 666,2 \text{ккал / кг} (27987 \text{кДж / кг})$$

$$S^{вых}(1,4 \text{ МПа}, 194^\circ\text{C}) = 1,5468 \text{ккал / (кг}\cdot\text{K)} (6,49 \text{кДж / (кг}\cdot\text{K)})$$

Удельная эксергия пара:

$$e_{пар} = h_{пар}^{вых} - h_{вода}^0 - T_0(S_{пар}^{вых} - S_{вода}^0) = 2798 - 105 - 298(6,49 - 0,37) = 869 \text{кДж / кг}$$

Полная эксергия пара:

$$E_{нар} = m_n \cdot e_n = 2,78 \cdot 869 = 2415,8 \text{ кВт}$$

5. Эксергия процесса теплообмена продуктов сгорания с охлаждающими экранными трубами:

$$E_Q = T_0 \sum_i^F S_i = 298 \cdot 6,4 = -1907,2 \text{ кВт}$$

Потери эксергии в топке парового котла:

$$D = E_в + E_{топл} - E_{нар} - E_Q = 97,3 + (236) - (-8383) - 2415,8 - 1907,2 = 3921 \text{ кВт}$$

Термодинамическая эффективность процессов сжигания газа (метана) в топке парового котла ДКВр 10/14:

$$\eta_{ex} = \frac{D}{E_T + E_B} = 1 - \frac{3921}{8147,3 + 97,3} = 0,525 \text{ или}$$

52,5%.

При интенсификации теплообмена в топке котла путем размещения вторичного цилиндрического излучателя из-за увеличения плотности радиационного теплового потока энергетические потери увеличиваются и составляют 2086 кВт, но уменьшается эксергия потока продуктов сгорания до 7932 кВт, поэтому эксергетическая эффективность повышается до  $\eta_{ex} = 1 - 0,399 = 0,601$  или 60,1%.

### Выводы

Результаты термодинамического анализа процесса сжигания газообразного топлива в топке парового котла ДКВр-10/14 показали, что основными потерями энергии являются:

- потери химического перехода топлива в продукты сгорания (сгорание газа);
- эксергия уходящих продуктов сгорания из топки котла;
- эксергия питательной воды, поступающей в топку котла;
- эксергия пара на выходе из топки;
- эксергия процесса теплообмена продуктов сгорания с экранными поверхностями.

Показано, что эксергетическая эффективность рабочих процессов составляет  $\eta_{ex} = 0,476$  или 47,6 %.

### Литература

1. Басок Б.И., Демченко В.Г., Мартыненко М.П. Численное моделирование процессов аэродинамики в топке водогрейного котла с вторичными излучателями // *Пром. Теплотехника*. - 2006. - №1. - с.17-22.
2. Герман М.Л., Бородуля А., Ноготов Е.Ф., Пальченко Г.И. Инженерный метод расчета температурного режима жаротрубного котла с тупиковой топкой // *Тепломассообмен ММФ – 2000: тр. IV Минского международного форума*. – Мн. 2000. т.2. – с.21-30.

3. Хаустов С.А., Заворин А.С., Фисенко Р.Н. Численное исследование процессов в жаротрубной топке с реверсивным факелом // *Изд. Томского политехнического университета*. – 2013. – т.322. - №4. – с.43-47.
4. Редько А.О., Давиденко А.В., Павловський С.В. та інші. Моделювання процесів теплообміну в топках водотрубних котлів ДКВР (ДЕ) – 10/14//*Вісник національного університету “Львівська політехніка”*. №844. – 2016. – с.180-188.
5. Четкин А.В., Занемонец Н.А. *Теплотехника*. – М. Высшая школа. – 1986. – с.344.
6. Баскаков А.П. *Теплотехника*. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – с.224.
7. Bejan A. *Advanced Engineering Thermodynamics*. – 3 rd.ed. – 2006.
8. Гохштейн Д.П. *Энтропийный метод расчета энергетических потерь*. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – с.112.
9. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. *Эксергетический метод и его приложения*. – М.: Энергоатомиздат, 1968. – с.288.
10. Шаргут Я., Петела Р. *Эксергия*. – М.: Энергия, 1968. – с.279.
11. Степанов В.С. *Химическая энергия и эксергия веществ*. – Новосибирск, 1990. – с.163.
12. Вукалович М.П. *Термодинамические свойства воды и водяного пара*. – М.: Машиз, 1955. – с.93.

### References

1. Basok, B.I., Demchenko V.G., & Martynenko, M.P. (2006). Numerical modeling of aerodynamic processes in the furnace of the boiler with a secondary emitter. *Industrial heating engineering*, 1, 17-22.
2. Herman, M.L., Borodulya, V.A., Nogotov, E.F., & Palchenok, G.I. (2000). Engineering calculation method of temperature fire-tube boilers with a combustion chamber deadlock. *Proceedings of IV Minsk International forum*, Minsk, 2, 21-30.
3. Khaustov, S.A., Zavorin, A.S., Fissenko, R.N. (2013). "Numerical study of processes in the fire tube furnace with reversible flame", *Proceedings of the Tomsk Polytechnic University*, Vol.322, 4, 43-47.
4. Red'ko A.O., Davidenko A.V., Pavlovsky S.V. & Kostyuk V.E. (2016). Modeling of heat transfer in furnaces water tube boilers DKVR (DE)-10/14. *News NU "Lviv politehnika". Series: Theory and practice of construction*, Lviv, 844, 180-187.
5. Chechetkin A.V., & Zanemonec N.A. (1986). Heat engineering. M.: High school, 344.
6. Baskakov A.P. Heat engineering. (1991). M.: Energoatomisdat, 224.
7. Bejan A. (2006). *Advanced Engineering Thermodynamics*. Wiley:3-rd.ed, 920.
8. Gokhshtein D.P. (1963). Entropy method for calculating the energy losses. M.: Gosenergoizdat, 122.

9. Brodyanskiy V.M., Fratsher V., & Mikhalek K. (1968). Exergic method and its application. *Energoatomisdat*, 288.
10. Shargut Ya., & Petela R. (1968). Exergy. *M.: Energy*, 279.
11. Stepanov V.S. (1990). Chemical energy and exergy substances. *Novosibirsk*, 163.
12. Vukalovich M.P. (1955). Thermodynamic properties of water and steam. *M.: Mashgiz*, 93.

**Автор:** РЕДЬКО Ігор Олександрович  
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Експлуатації газових і теплових систем, ХНУМГ ім. О.М. Бекетова  
E-mail: germes\_s@mail.ru

**Автор:** РЕДЬКО Андрій Олександрович  
доктор технічних наук, професор, професор кафедри ТГВ та ТВЕР, ХНУБА  
E-mail: andrey.ua-mail@mail.ru

**Автор:** ДАВІДЕНКО Анастасія В'ячеславівна  
аспірант, аспірант кафедри ТГВ та ТВЕР, ХНУБА  
E-mail: anastasiya.tasse@gmail.com

## ТHERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE COMBUSTION PROCESS IN A STEAM WATER-TUBE BOILERS

I. Redko, A. Redko, A. Davidenko

<sup>1</sup>O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

<sup>2</sup>Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv

*Increase efficiency of operation boilers and energy-saving solution to problems with the fuel gas combustion is possible by mathematical modeling workflows in the furnaces of boiler units. Results of the analysis of gaseous fuel combustion processes in the furnace water tube boiler type DKVr are presented. The thermodynamic parameters of methane combustion reaction - a change of enthalpy and entropy in different conditions of cooling of the reaction products. Made exergy analysis of work processes in the furnace of the boiler. Increasing the efficiency of operation of boiler units and solving energy saving problems when burning gaseous fuels is possible by mathematical modeling of work processes in the furnaces of boiler units. Computer modeling and the use of numerical methods for studying the processes of gas combustion, aerodynamic and heat exchange processes is efficient and less expensive.*

*With the intensification of heat transfer in the furnace of the boiler by placing a secondary cylindrical radiator due to the increase in the density of the radiative heat flux, the energy losses increase and amount to 2086 kW, but the exergy of the combustion product stream decreases to 7932 kW, so the exergy efficiency rises to 60.1%.*

**Keywords:** combustion reaction, combustion processes, enthalpy, entropy, exergy, exergy efficiency.

## ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТОПКОВИХ ПРОЦЕСІВ В ПАРОВИХ ВОДОТРУБНИХ КОТЛАХ

І. Редько<sup>1</sup>, А. Редько<sup>2</sup>, А. Давіденко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків

<sup>2</sup>Харківський Національний університет будівництва та архітектури, Харків

*Наведено результати аналізу процесів спалювання газоподібного палива в топці водотрубного парового котла типу ДКВР. Визначено термодинамічні параметри реакції горіння метану - зміна ентальпії і ентропії при різних умовах охолодження продуктів реакції. Виконано ексергетичний аналіз робочих процесів в топці парового котла.*

**Ключові слова:** реакція горіння, топкові процеси, ентальпія, ентропія, ексергія, ексергетичний ККД.