

УДК 621.436 + 696.42 : 697.386

Л.М. Крутий, И.Е. Матёрка

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба

## ГАЗОВЫЙ БАЛАНС В КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ НА БАЗЕ МОТОР-ГЕНЕРАТОРА 11ГД100М

*В статье рассматривается возможность оптимального согласования газовых потоков мотор-генератора и котла-утилизатора по избыточному кислороду в отработавших газах мотор-генератора.*

*энергетика, когенерационные установки, утилизация тепла*

### Введение

**Постановка проблемы.** В настоящее время в связи со сбережением энергоресурсов наметилась тенденция внедрения когенерационных установок на базе газовых мотор-генераторов, снабжённых утилизаторами тепла отработавших газов, систем охлаждения и смазки [1]. Опытная когенерационная установка на базе газового мотор-генератора типа 11ГД100М и парового котла типа ДКВР-10-13 не является оптимальным решением проблемы, потому что в ней не решён вопрос оптимального согласования газовых трактов. Поэтому возник вопрос о выяснении условий оптимальной работы газового мотора с котлом-утилизатором, в котором производится дожиг не использованного кислорода в процессе сгорания топлива в цилиндрах поршневого двигателя.

**Обзор литературы.** В последнее время в связи с повышением общемировых цен на энергоносители, появились публикации по повышению рационального использования углеводородного топлива [1, 2]. В [1 – 4] приведены данные по основным принципам использования углеводородного топлива.

### Основная часть

Вспользуемся методикой, изложенной в [2], для определения состава и количества продуктов сгорания в отработавших газах мотор-генератора на базе двухтактного инвертированного дизельного мотора и парового котла-утилизатора.

Состав сухого газообразного топлива в процентном отношении по объёму:

$$\text{CO} + \text{H}_2 + \sum C_m \text{H}_n + \text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 = 100\%, \quad (1)$$

где негорючей частью балласта является азот и двуокись углерода.

Для полного сгорания  $1 \text{ нм}^3$  сухого газообразного топлива необходим объём воздуха

$$V_B^0 = 0,0476 \left[ 0,5 (\text{CO} + \text{H}_2) + 1,5 \text{H}_2\text{S}' + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m \text{H}_n - \text{O}_2 \right]. \quad (2)$$

Для природного газа состава:

$$\begin{aligned} \text{CH}_4 &= 76,7\%; \quad \text{C}_2\text{H}_6 = 4,5\%; \quad \text{C}_3\text{H}_8 = 1,7\%; \\ \text{C}_4\text{H}_{10} &= 0,8\%; \quad \text{C}_5\text{H}_{12} = 0,6\%; \quad \text{H}_2 = 1,0\%; \\ \text{CO}_2 &= 0,2\%; \quad \text{N}_2 = 14,5\%; \end{aligned}$$

теоретически необходимо сухого воздуха

$$\begin{aligned} V_B^0 &= 0,0476 \left[ 0,5 \cdot 1 + \left( 1 + \frac{4}{4} \right) 76,7 + \left( 2 + \frac{6}{4} \right) 4,5 + \right. \\ &\quad \left. + \left( 3 + \frac{8}{4} \right) 1,7 + \left( 4 + \frac{10}{4} \right) 0,8 + \left( 5 + \frac{12}{4} \right) 0,6 \right] = \\ &= 9,08 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3. \end{aligned}$$

Если объём сухих газовых продуктов сгорания принять за 100%, то при полном сгорании топлива состав сухих продуктов в процентах по объёму составит

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 = 100\%. \quad (3)$$

Газообразные продукты сгорания состоят из трёхатомных газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{SO}_2$ , сумму которых принято обозначать символом  $\text{RO}_2$ , и двухатомных газов – кислорода  $\text{O}_2$  и азота  $\text{N}_2$ . Тогда уравнение (3) примет вид:

при полном сгорании

$$\text{RO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 = 100\%, \quad (4)$$

при неполном сгорании

$$\text{RO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{CO} = 100\%. \quad (5)$$

Объём сухих трёхатомных газов находится делением массы  $\text{CO}_2$  и  $\text{SO}_2$  на их плотность при нормальных условиях

$$\begin{aligned} V_{\text{RO}_2} &= 0,01 (\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S}' + \sum m C_m \text{H}_n = \\ &= 0,01 (0,2 + 1 + 76,7 + 24,5 + 371,7 + 40,8 + 50,6) = (6) \\ &= 0,98 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3. \end{aligned}$$

Объём азота в продуктах сгорания:

$$\begin{aligned} V_{\text{N}_2} &= 0,79 V_B^0 + 0,01 \text{N}_2 = \\ &= 0,79 \cdot 9,08 + 0,01 \cdot 14,5 = 7,32 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3. \end{aligned} \quad (7)$$

Объём водяных паров

$$V_{H_2O} = 0,01 \left( H_2S' + H_2 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,124d \right) + 0,0161 V_B^0, \quad (8)$$

где  $d = 10 \text{ г/нм}^3$  – влагосодержание газообразного топлива, отнесённое к  $1 \text{ нм}^3$  сухого воздуха;

$$V_{H_2O} = 0,01 \left( 1 + \frac{4}{2} 76,7 + \frac{6}{2} 4,5 + \frac{8}{2} 1,7 + \frac{10}{2} 0,8 + \frac{12}{2} 0,6 + 0,124 \cdot 10 \right) + 0,0161 \cdot 9,08 = 1,98 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3.$$

Полный объём продуктов сгорания (отработавших газов газового двигателя)

$$V_{\Gamma} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + V_B^0 (\alpha_{MG} - 1) = 0,98 + 7,32 + 1,98 + 9,08 (2,3 - 1) = 22,084 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3, \quad (9)$$

где  $\alpha_{MG} = 2,3$  – коэффициент избытка воздуха для газового мотор-генератора 11ГД100М [3].

Теплота сгорания  $1 \text{ нм}^3$  чистого сухого газа при нормальных условиях

$$H_{и} = 0,01 \left( H_{иCO} CO + H_{иH_2} H_2 + \sum H_{иC_m H_n} C_m H_n + H_{иH_2S} H_2S \right) = 0,01 (23450 \cdot 1 + 35850 \cdot 76,7 + 63850 \cdot 4,5 + 91300 \cdot 1,7 + 18700 \cdot 0,8 + 146200 \cdot 0,6) = 33,981 \text{ МДж/нм}^3. \quad (10)$$

Расход природного газа газовым мотор-генератором 11ГД100М, при удельном часовом расходе  $q_{\Gamma} = 0,3 \text{ нм}^3 / \text{кВт} \cdot \text{ч}$  при низшей теплотворной способности топлива  $H_{и}' = 31,4 \text{ МДж/нм}^3$  [3] составляет

$$V_{MG}' = q_{\Gamma} N_{НОМ} = 0,3 \cdot 1000 = 300 \text{ нм}^3 / \text{ч}. \quad (11)$$

При работе на номинальной мощности  $N_{НОМ} = 1000 \text{ кВт}$  и на расчётном природном газе с низшей теплотворностью  $H_{и} = 33,981 \text{ МДж/нм}^3$

$$V_{MG} = V_{MG}' \frac{H_{и}'}{H_{и}} = 300 \frac{31,4}{33,981} = 277,2 \text{ нм}^3 / \text{ч}. \quad (12)$$

Следовательно, количество продуктов сгорания (отработавших газов мотор-генератора) будет

$$V_{MFOГ} = V_{\Gamma} V_{MG} = 22,084 \cdot 277,2 \text{ нм}^3 / \text{ч}. \quad (13)$$

Объём кислорода в отработавших газах при сгорании  $1 \text{ нм}^3 / \text{ч}$  газа в цилиндрах двигателя

$$V_{O_2} = 0,21 (\alpha_{MG} - 1) V_B^0 = 0,21 (2,3 - 1) 9,08 = 2,479 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3, \quad (14)$$

а его полный объём в отработавших газах

$$V_{O_2OГ} = V_{MG} V_{O_2} = 277,2 \cdot 2,479 = 687,13 \text{ нм}^3 / \text{ч}. \quad (15)$$

В котле-утилизаторе процесс сгорания происходит при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha_k = 1,1$  [4] поэтому, используя отработавшие газы мотор-генератора, в котле-утилизаторе возможно ещё сжечь дополнительное топливо

$$V_{\Gamma\Gamma} = \frac{V_{O_2OГ}}{0,21 \alpha_k V_B^0} = \frac{687,13}{0,21 \cdot 1,1 \cdot 9,08} = 327,6 \text{ нм}^3 / \text{ч}. \quad (16)$$

Воздушные паровые котлы версии [5]:

– ДКВР-2,5-13 имеют производительность  $3,75 \text{ т/ч}$  при сжигании  $280 \text{ нм}^3 / \text{ч}$  природного газа;

– ДКВР-4-3 имеют производительность  $6 \text{ т/ч}$  при сжигании  $446 \text{ нм}^3 / \text{ч}$  природного газа.

Если использовать эти котлы в режиме дожига кислорода, то ДКВР-2,5-13 будет работать с коэффициентом избытка воздуха

$$\alpha = \frac{327,6 \cdot 11}{280} = 1,287, \quad (17)$$

а ДКВР-4-13 с

$$\alpha = \frac{327,6 \cdot 11}{446} = 0,808. \quad (18)$$

Следовательно, котёл ДКВР-4-13 будет работать на кислороде, входящем в состав отработавших газов двигателя, не на полную мощность. Но здесь необходимо учесть тепловую напряжённость элементов котла.

Расчётная тепловая напряжённость котла ДКВР-4-3

$$Q_1 = V_{НОМ} H_{и} = 446 \cdot 33,981 = 15155,5 \text{ МДж/ч} = 3,62 \text{ Гккал/ч}. \quad (19)$$

При подачи отработавших газов из двигателя при температуре  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  тепловая напряжённость повысится. Поэтому необходимо учесть суммарное тепло, внесенное с отработавшими газами и полученное в результате дожига кислорода.

Возможное количество тепла, полученное при сжигании газа,

$$Q_k = V_{\Gamma\Gamma} H_{и} = 327,6 \cdot 33,981 = 11132,2 \text{ МДж/ч}. \quad (20)$$

Исходя из того, что отработавшие газы газового мотор-генератора в топке котла-утилизатора вносят дополнительное тепло в количестве  $Q_{OГ} = 3708,15 \text{ МДж/ч}$  [1], то общее тепло, располагаемое котлом-утилизатором, составит

$$Q_E = Q_{OГ} + Q_k = 3708,15 + 11132,2 = 14840,3 \text{ МДж/ч}. \quad (21)$$

Учитывая, что коэффициент полезного действия водогрейных котлов находится в пределах 0,90 [4], то когенерационная установка будет иметь тепловую производительность при давлении наддувочного воздуха  $p_k = 0,20 \div 0,27 \text{ кгс/см}^2$  [3], создаваемого механической газодувкой двигателя

$$Q_y = Q_{\Sigma} \eta_k = 1480,3 \cdot 0,90 = 13356,3 \text{ МДж/ч} = 3,19 \text{ Гккал/ч.} \quad (22)$$

При сжигании в котле-утилизаторе дополнительно  $327,6 \text{ нм}^3/\text{ч}$  природного газа при низшей тепловодной способности  $H_{\text{н}} = 33,981 \text{ МДж/нм}^3$ .

Таким образом, теплонапряжённость элементов котла при номинальном режиме выше на

$$\gamma = 100 \frac{3,62 - 3,19}{3,62} = 11,9\%, \quad (23)$$

чем при работе в режиме дожига кислорода отработавших газов.

Можно, в первом приближении считать, что и производительность котла в режиме утилизации тепла снизится на 12% и составит

$$m = (1 - 0,12) \cdot 6 = 5,28 \text{ т/ч.} \quad (24)$$

Отношение расходов газа газовым мотором и котлом-утилизатором составляет

$$\gamma = \frac{V_{\text{МГ}}}{V_{\text{к}}} = \frac{277,2}{327,6} = 0,846 \quad (25)$$

и может считаться оптимальным.

Коэффициент полезного действия когенерационной установки

$$\eta_y = \frac{\sum Q_{\text{ВЫХ}}}{\sum Q_{\text{ВХ}}} = \frac{Q_{\text{СГ}} + (Q_{\text{ОГ}} + Q_{\text{к}}) \eta_k}{Q_{\text{ВХМГ}} + Q_{\text{ВХк}}} = \frac{3817,6 + (3708,15 + 11132,3) \cdot 0,90}{10533,60 + 11132,2} = 0,806, \quad (26)$$

где  $Q_{\text{СГ}}$  – тепло эквивалентное электрической энергии на выходе синхронного генератора, МДж/ч;  $Q_{\text{ВХМГ}}$  – тепло внесённое в цилиндр двигателя при сгорании газа, МДж/ч;  $Q_{\text{к}}$  – тепло внесённое в котёл-утилизатор при сгорании в его топке газа, МДж/ч;  $Q_{\text{ОГ}}$  – тепло внесённое в котёл-утилизатор с отработавшими газами мотор-генератора, МДж/ч;  $\eta_k$  – коэффициент полезного действия.

Коэффициент полезного действия газового мотор-генератора

$$\eta_{\text{МГ}} = \frac{Q_{\text{СГ}}}{Q_{\text{ВХМГ}}} = \frac{3817,6}{10533,6} = 0,362. \quad (27)$$

Коэффициент полезного действия котла-утилизатора

$$\eta_k = 0,90. \quad (28)$$

В результате объединения в один агрегат газового мотор-генератора 11ГД100М и котла ДКВР-4-13, который работает только на оставшимся в отработавших газах кислороде, к.п.д. установки выше к.п.д. мотор-генератора и ниже к.п.д. котла-утилизатора.

Поэтому экономический эффект когенерационной установки необходимо оценивать по фактической экономии природного газа

$$\Delta V_{\text{Г}} = \frac{Q_{\text{ОГ}}}{H_{\text{н}}} = \frac{3708,15}{33,981} = 109,1 \text{ нм}^3/\text{ч.} \quad (29)$$

Расход природного газа при работе котла-утилизатора без подачи в него отработавших газов мотор-генератора

$$V_{\text{Г}}' = \frac{Q_{\Sigma}}{H_{\text{н}}} = \frac{14833,53}{33,981} = 436,52 \text{ нм}^3/\text{ч.} \quad (30)$$

Следовательно, экономия расхода природного газа составляет

$$\gamma = \frac{\Delta V_{\text{Г}}}{V_{\text{Г}}'} = 100 \frac{109,1}{436,52} = 25\%. \quad (31)$$

## Выводы

Таким образом, объединение в один агрегат газового мотор-генератора 11ГД100М с котлом ДКВР-4-13, работающим в режиме котла-утилизатора на кислороде отработавших газов, позволяет экономить до 25% природного газа.

## Список литературы

1. Крутий Л.М., Заславский Е.Г., Ребров Л.В. Когенерационные установки на базе газовых мотор-генераторов // Коммунальное хозяйство городов. – К.: Техника. – 2004. – № 58. – С. 112-120.
2. Киселев Н.А. Котельные установки. – М.: Высшая школа, 1979. – 270 с.
3. Мотор-генератор 11ГД100М. Технические условия ТУЗ-408-76. – Х.: Харьковский завод им. Малышева, 1976. – 93 с.
4. Стецкий Л.Р. Кочегар котельных на жидком и газовом топливе. – М.: Наука, 1964. – 343 с.
5. Справочник эксплуатационника газофицированных котелен / Под ред. Е.Б. Столнера. – Л.: Недра, 1988. – 608 с.

Поступила в редколлегию 2.04.2007

**Рецензент:** канд. техн. наук, доцент А.Н. Панченко, Харьковский университет Воздушных сил им. И. Кожедуба, Харьков.