

условиях для любого топлива, но и оптимизировать конструктивные размеры котлов [3], режим их эксплуатации, выбор конструктивных материалов топки и газоходов, способствующих лучшей проводимости теплоты через стенки.

1. Лук'янов О.В. Теплогенераторы для локальных систем теплоснабжения. – Мakiївка: ДонДАБА, 2003. – 156 с.

2. Губарь С.А., Качан А.В., Лукьянов А.В. Разработка параметрического ряда жаротрубных теплогенераторов для локального теплоснабжения // Вісник ДонДАБА. №4(41). – Мakiївка: ДонДАБА, 2003. – С. 3-5.

3. Качан В.М., Качан О.В., Акініна А.Г. Універсальність ймовірнісного методу моделювання масообмінних процесів // Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції “Наука і освіта 2004”: Зб. наук. праць Дніпропетровського інж.-буд. ін-ту. – Дніпропетровськ, 2004. – С.57-60.

Получено 21.06.2004

УДК 621.436 + 696.42 : 697.326

Л.М.КРУТИЙ, Е.Г.ЗАСЛАВСКИЙ, кандидаты техн. наук

Государственное научно-производственное предприятие «Метэнергомаш», г.Харьков

Л.В.РЕБРОВ

Северо-восточный научный центр НАН Украины, г.Харьков

КОГЕНЕРАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ГАЗОВЫХ МОТОР-ГЕНЕРАТОРОВ

Рассматриваются когенерационные установки с бойлерной системой утилизации тепла менее экономичные, чем с котлами утилизаторами, в которых отработавшие газы мотор-генераторов непосредственно участвуют в процессе сгорания природного газа в топках котла.

Энергетический кризис в Украине, характеризующийся необходимостью импорта до 41% энергоносителей, побуждает исследователей и разработчиков к поиску и реализации способов экономии энергоресурсов, повышению КПД энергоустановок, использованию альтернативного топлива, созданию менее энергоемкого технического оборудования и предприятий [1,2].

В газовых двигателях стационарных мотор-генераторов в полезную работу превращается около одной трети теплоты, выделяющейся при сжигании топлива. Остальная теплота теряется с отработавшими газами и в системах охлаждения [3].

Рентабельность газовых двигателей может быть существенно повышена путем утилизации теплоты отработавших газов, охлаждающей жидкости и масла. Так, если КПД двигателя находится в пределах 32-42%, то при использовании теплоты, отводимой с охлаждающей жидкостью и отработавшими газами при снижении их температуры до

180 °С общий КПД энергетической установки с газовым двигателем по источникам научно-технической информации [4] может достигать 73,5-80,7%.

Однако, на наш взгляд, этот показатель вызывает сомнение и требует уточнения. Поэтому проведем количественную оценку двух систем утилизации тепла: бойлерную систему и систему дожигания отработавших газов в котлах утилизаторах, используемых в когенерационных установках на базе стационарных мотор-генераторов АООТ "Первомайскдизельмаш" и ГП "Завод им. Малышева".

АООТ "Первомайскдизельмаш" выпускает когенерационные установки, производящие 315, 500 и 630 кВт электрической и 360 МДж/ч (100 кВт), 540 МДж/ч (150 кВт) и 720 МДж/ч (200 кВт) тепловой энергии соответственно. При использовании классической (бойлерной) системы утилизации тепла с помощью четырех теплообменников (охлаждения наддувочного воздуха, масла, воды, отработавших газов) и экономайзера, нагрев воды может достигать 85-90 °С при расходе технической воды от 5 до 30 м³/ч [5] (рис.1).

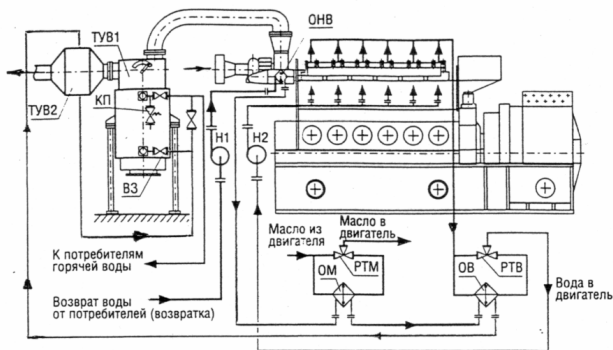


Рис.1 – Когенерационная установка завода "Первомайскдизельмаш":

ТУВ1 (теплообменник утилизационный водогрейный) – охладитель отработавших газов; ТУВ2 – экономайзер; Н1 – насос водяной внешнего контура; Н2 – насос водяной внутреннего контура; ОМ – охладитель масла; ОВ – охладитель воды; ОНВ – охладитель наддувочного воздуха; ВЗ – вентиль запорный; КП – клапан предохранительный; РТМ – регулятор температуры масла; РТВ – регулятор температуры воды.

Практически нагрев воды до указанной температуры [5] при первоначальном ее значении +20 °С может быть обеспечен только для массы воды (в т/ч или м³/ч при $d_{H_2O} = 1,0 \text{ т/м}^3$) в установках, мощность которых:

- 315 кВт – 1,32 м³/ч при 85 °С и 1,23 м³/ч при 90 °С;
- 500 кВт – 1,98 м³/ч при 85 °С и 1,84 м³/ч при 90 °С;

630 кВт – 2,64 м³/ч при 85 °С и 2,46 м³/ч при 90 °С.

Тепло, вносимое с газом в мотор-генераторы различной мощности при часовом расходе топлива $g_{500} = 170 \text{ м}^3/\text{ч} + 10\%$ и $g_{630} = 215 \text{ м}^3/\text{ч} + 10\%$ на номинальной мощности при низшей теплотворной способности газа $H_u = 31,4 \text{ МДж}/\text{м}^3$, соответственно составляет:

$$Q_1 = H_u g, \quad (1)$$

$$Q_{1.500} = 31,4(170+17) = 5,87 \cdot 10^3 \text{ МДж}/\text{ч},$$

$$Q_{1.630} = 31,4(215+21,5) = 7,44 \cdot 10^3 \text{ МДж}/\text{ч}.$$

Используемая доля этой энергии может быть представлена соответствующими КПД:

- на производство электрической энергии

$$\eta_{Э.500} = 30,66\% \text{ и } \eta_{Э.630} = 30,51\%;$$

- на подогрев воды

$$\eta_{Т.500} = 9,20\% \text{ и } \eta_{Т.630} = 9,68\%,$$

т.е. в целом КПД этих установок достигает

$$\eta_{\Sigma.500} = 39,86\% \text{ и } \eta_{\Sigma.630} = 40,19\%.$$

При этом экономия расхода газа составляет:

$$\Delta g_{500} = 17,20 \text{ м}^3/\text{ч} \text{ или } 9,20\%, \Delta g_{630} = 22,93 \text{ м}^3/\text{ч} \text{ или } 9,68\%.$$

Среднее значение тепловой энергии, переданной на подогрев воды в когенерационных установках на базе мотор-генераторов завода "Первомайскдизельмаш", составляет 31,2% от их номинальной электрической мощности при снижении температуры отработавших газов с 600 °С на выходе из двигателя до 150 °С на выходе из экономайзера в атмосферу. При этом в двух последних теплообменниках срабатывает тепловой перепад отработавших газов, соответствующий разности температур $\Delta t = 450 \text{ }^\circ\text{С}$.

Тепловой баланс газового мотор-генератора 11ГД100М [4]:

- тепло, вносимое в мотор-генератор 10533,60 МДж/ч,
т.е. 100%,

- тепло, переданное в систему охлаждения 1592,20 МДж/ч,
т.е. 15,15%,

- тепло, переданное в масло 1152,25 МДж/ч,
т.е. 10,94%,

- тепло, уносимое с отработавшими газами 3708,15 МДж/ч,
т.е. 35,20%,

- тепло, рассеянное в окружающую среду 431,57 МДж/ч,
т.е. 4,10%,

- эквивалентное тепло, переданное генератору 3817,60 МДж/ч,

т.е. 36,24%.

Погрешность теплового баланса составляет 1,63%, что вполне допустимо.

Если принять, что передаваемое тепло на подогрев воды составляет 31,2% от выходной мощности генератора

$$Q_{H_2O} = 0,312 \cdot 3600 = 1123,2 \text{ МДж/ч,}$$

при расходе технической воды $100 \text{ м}^3/\text{ч}$, то подогрев ее будет всего на

$$\Delta t = \frac{Q_{H_2O}}{C_{H_2O} m_{T.B}} = \frac{1123,2}{4,19 \cdot 100} = 2,68 \text{ }^\circ\text{C.} \quad (2)$$

Это же тепло может обеспечить подогрев до $90 \text{ }^\circ\text{C}$ только объем воды, равный

$$m_{H.B} = \frac{Q_{H_2O}}{C_{H_2O} \Delta t} = \frac{1123,2}{4,19(90 - 20)} = 3,83 \text{ м}^3/\text{ч,} \quad (3)$$

что составляет 3,83% от всей технической воды. Кроме того, необходимо учесть, что температурный напор отработавших газов в их теплообменниках у мотор-генераторов 11ГД100М в 2,65 раза ниже, чем в когенерационных установках на базе мотор-генераторов завода "Первомайскдизельмаш", а также более низкий тепловой напор и в системах охлаждения масла и воды. Следовательно, выход подогретой воды до $90 \text{ }^\circ\text{C}$ будет еще меньше.

Тепло, передаваемое технической воде из системы охлаждения воды и масла

$$Q_{T.H_2O} = Q_B + Q_M = 1592,20 + 1152,25 = 2744,45 \text{ МДж/ч.} \quad (4)$$

При поднятии перепада температуры в теплообменнике охлаждающей воды до $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и масла до $15 \text{ }^\circ\text{C}$ расход технической воды при последовательном соединении теплообменников может быть снижен до

$$m_{T.B} = \frac{Q_{T.H_2O}}{C_{H_2O}(\Delta t_B + \Delta t_M)} = \frac{2744,45}{4,19(20 + 15)} = 18,7 \text{ м}^3/\text{ч,} \quad (5)$$

что приведет к ее подогреву на $35 \text{ }^\circ\text{C}$, т.е. до температуры $55 \text{ }^\circ\text{C}$.

Расход технической воды в системе охлаждения второго контура мотор-генератора 11ГД100М [6] примерно в 2 раза больше, чем подача питательной воды в паровой котел типа ДКВР-10-13 [7].

Если отработавшие газы мотор-генератора 11ГД100М направить непосредственно в топку парового котла ДКВР-10-13 (рис.2), то все тепло отработавших газов будет внесено в тепловой баланс котла, а

отработавшие газы без их охлаждения в выпускных патрубках двигателя позволят дополнительно внести в котел еще около 5% тепла

$$Q_{O.G.} = 1,05 \cdot 3708,15 = 3883,56 \text{ МДж/ч.} \quad (6)$$

При номинальной теплопроизводительности парового котла ДКВР-10-13 6,3Гкалл/ч ($26,38 \cdot 10^3$ МДж/ч) и КПД 90-92% [8] он потребляет газа

$$Q_{K1} = \frac{Q_{K2}}{\eta_K} = \frac{26,38 \cdot 10^3}{0,90 \div 0,92} = (29,31 \div 28,67) \cdot 10^3 \text{ МДж/ч.} \quad (7)$$

В результате дополнительного внесения в топку котла $3,894 \cdot 10^3$ МДж/ч тепла КПД котла повысится на

$$\Delta \eta_K = 100 \frac{3,894 \cdot 10^3}{29,31 \div 28,67 \cdot 10^3} = 13,29 \div 13,58\% \quad (8)$$

и при этом экономия расхода газа составит

$$\Delta V_1 = Q_{O.G.} / H_u = 3,89 \cdot 10^3 / 31,4 = 123,9 \text{ нм}^3/\text{ч.} \quad (9)$$

Если принять, что питательная вода в котел подается не при $+20$ °С, а при $+55$ °С, т.е. после охлаждения мотор-генератора, то в котел дополнительно вносится еще

$$\Delta Q_{T.B.K.} = 0,5 \cdot 2744,45 = 1372,23 \text{ МДж/ч,} \quad (10)$$

что приведет к дополнительной экономии расхода газа на

$$\Delta V_2 = \Delta Q_{T.B.K.} / H_u = 1372,23 / 31,4 = 43,7 \text{ нм}^3/\text{ч.} \quad (11)$$

Следовательно, общая экономия газа равна

$$\Delta V_{\Sigma} = \Delta V_1 + \Delta V_2 = 123,9 + 43,7 = 167,6 \text{ нм}^3/\text{ч.} \quad (12)$$

Расход газа мотор-генератором 11ГД100М составляет

$$V_{MG} = Q_1 / H_u = 10533,60 / 31,4 = 335,5 \text{ нм}^3/\text{ч,} \quad (13)$$

а паровым котлом ДКВР-10-13

$$V_K = (29,31 \div 28,67) / 31,4 = 933,4 \div 913,1 \text{ нм}^3/\text{ч.} \quad (14)$$

Общий расход газа при отдельной работе мотор-генератора на номинальной мощности и парового котла с номинальной теплопроизводительностью будет

$$V_U = V_{MG} + V_K = 335,5 + (933,4 \div 913,1) = 1268,9 \div 1248,6 \text{ нм}^3/\text{ч.} \quad (15)$$

Расход газа, эквивалентный электрической мощности генератора, составляет

$$V_G = 3600 / 31,4 = 114,65 \text{ нм}^3/\text{ч.} \quad (16)$$

Теоретически КПД когенерационной установки на базе мотор-

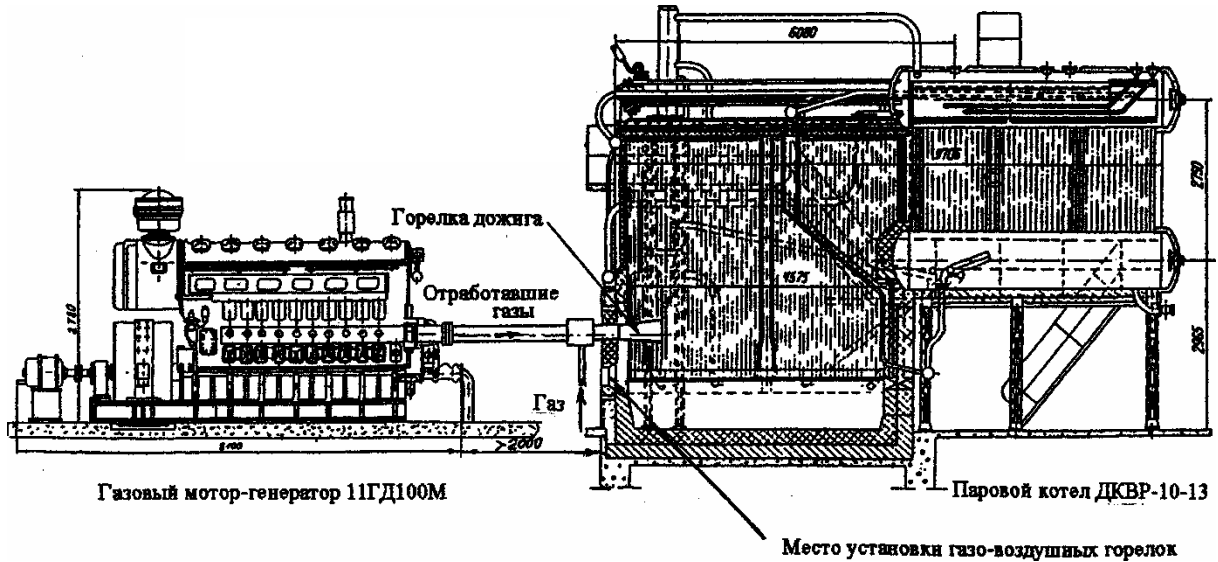


Рис.2 – Когенерационная установка на базе газового мотор-генератора 11ГД100М и парового котла ДКВР-10-13.

генератора 11ГД100М и парового котла ДКВР-10-13 может быть

$$\eta_{\gamma} = 100 \frac{V_K - \Delta V_{\Sigma} + V_{\Gamma}}{V_{\gamma}} = \frac{(933,4 + 913,1) - 167,6 + 114,7}{1268,7 + 1248,6} = 69,41248,6 \%, \quad (17)$$

что гораздо выше, чем у когенерационных установок на базе мотор-генератора "Первомайскдизельмаш".

Газовые моторы 11ГД100М имеют электрофакельное воспламенение рабочей смеси, что обеспечивает устойчивую работу мотор-генераторов в широком диапазоне нагрузок. Очистка цилиндров от отработавших газов производится их продувкой надувочным воздухом, что приводит к дополнительному расходу воздуха. Поэтому коэффициент избытка воздуха лежит в пределах $\alpha_{MG} = 2,3$ на номинальной мощности мотор-генератора. При этом избыток кислорода в отработавших газах может быть оценен коэффициентом избытка воздуха в пределах $\alpha = 1,3$. Для обеспечения полного сгорания газа в топке котла ДКВР-10-13 требуется $\alpha_K = 1,1$, что позволяет в среде отработавших газов мотор-генератора дополнительно сжечь природный газ.

Теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания природного газа, например, Шебелинского месторождения $V_O = 0,0476(2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} - 0,2O_2) = 0,0476(2 \cdot 89,9 + 3,5 \cdot 3,1 + 5 \cdot 0,9 + 6,5 \cdot 0,4 - 0,2 \cdot 1,0) = 9,40 \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (18)$

Расход воздуха мотор-генератором при коэффициенте избытка воздуха $\alpha_{MG} = 2,3$

$$V_{MG.B} = \alpha_{MG} V_O \frac{Q_1}{H_u} = 2,3 \cdot 9,40 \frac{10533,60}{31,4} = 725,3 \text{ нм}^3/\text{ч}. \quad (19)$$

Объем газа, который сжигается в топке котла за счет наличия кислорода в отработавших газах мотор-генератора при $\alpha_{MG} = 1,3$

$$\Delta V_{KG} = \frac{\alpha_{MG} - 1}{\alpha_K} \frac{Q_1}{H_u} = \frac{2,3 - 1}{1,1} \frac{10533,60}{31,4} = 396,5 \text{ нм}^3/\text{ч}. \quad (20)$$

Так как 11ГД100М имеет два выхлопных коллектора, то необходимо в котле устанавливать две отдельные горелки, рассчитанные на пропускную способность отработавших газов каждого коллектора и на пропускную способность природного газа в объеме

$$\Delta V_{\Gamma\Gamma} = \Delta V_{\Gamma} / i = 396,5 / 2 = 198,2 \text{ нм}^3/\text{ч}. \quad (21)$$

Для реализации полной производительности котла ДКВР-10-13 необходимо еще дополнительно сжечь в среде атмосферного воздуха в топке котла дополнительный объем газа

$V_{KTB} = V_K - \Delta V_{KT} = (933,4 \div 913,1) - 396,5 = 536,2 \div 516,6 \text{ м}^3/\text{ч}$, (22)
при этом необходимо дополнительно подать в топку котла воздух в количестве

$$V_{KB} = \alpha_K V_O V_{KTB} = 1,1 \cdot 9,40 \cdot 536,2 = 54,44 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (23)$$

поэтому котел должен иметь дополнительно свою систему подачи воздуха.

Такая когенерационная установка на базе мотор-генератора 11ГД100М и парового котла ДКВР-10-13, разработанная в ГНПП “Метэнергомаш” в г.Харькове, в настоящее время внедряется на ОАО “ЖБИ-4” в г.Белгороде (Российская Федерация).

Если котел-утилизатор работает только на остатке кислорода в отработавших газах, то количество тепла, внесенное в топку котла, будет

$$Q_{K1}^* = Q_{OG} + \Delta V_{KT} / H_u = 3708,2 + 396,5 / 31,4 = 3720,8 \text{ МДж/ч}, \quad (24)$$

а его производительность при температуре питательной воды +20 °С и при КПД $\eta_K^* = 90\%$ составит

$$Q_{K2}^* = \eta_K^* Q_{K1}^* = 0,9 \cdot 3720,8 = 3348,7 \text{ МДж/ч (0,8Гкалл/ч)}. \quad (25)$$

Следовательно, КПД когенерационной установки на базе мотор-генератора 11ГД100М с использованием котла-утилизатора с дожигом только кислорода отработавших газов мотор-генератора равен

$$\eta_V^* = 100 \frac{Q_G + Q_{K2}^*}{Q_{MG} + Q_{K1}^*} = 100 \frac{3600,0 + 3348,7}{10533,6 + 3720,8} = 48,75\% . \quad (26)$$

Таким образом, КПД когенерационных установок, использующих дожиг только кислорода отработавших газов мотор-генератора, ниже, чем в установках, содержащих более производительные котлы с подачей в их топку дополнительно атмосферного воздуха, поскольку здесь превалирует более высокий КПД котла по отношению к КПД мотор-генератора, но все же выше, чем в когенерационных установках с утилизаторами тепла бойлерного типа.

В четырехтактных газовых двигателях завода “Первомайскидзельмаш” применено непосредственное воспламенение рабочей смеси цилиндра от электрической искры. При этом газовая смесь устойчиво воспламеняется только при избытке воздуха в пределах от 0,8 до 1,3. Поэтому в этих двигателях применено регулирование подачи воздуха при помощи воздушной заслонки, что снижает до минимума содержание чистого кислорода в отработавших газах. Следовательно, эти мотор-генераторы не могут работать с котлами-утилизаторами, дожигаю-

щими кислород отработавших газов мотор-генераторов.

Проведенные аналитические расчеты свидетельствуют, что для когенерационных установок:

- на базе двухтактных мотор-генераторов наиболее эффективна система дожигания кислорода отработавших газов в котлах-утилизаторах. При этом расчетный КПД установки на базе 11ГД100М с паровым котлом ДКВР-10-13 не может превысить 69,4%, а экономия газа – 167,6 $\text{нм}^3/\text{ч}$;

- на базе четырехтактных газовых мотор-генераторов АООТ “Первомайскдизельмаш” с утилизатором тепла бойлерного типа КПД мотор-генераторов мощностью 500 кВт не будет превышать 39,86%, а мощностью 630 кВт – 40,19%. При этом экономия газа составит 17,2 и 22,9 $\text{нм}^3/\text{ч}$ соответственно.

Таким образом, когенерационные установки на базе двухтактных газовых мотор-генераторов с дожиганием кислорода отработавших газов в котлах-утилизаторах более эффективны и экономичны, чем когенерационные установки на базе четырехтактных газовых мотор-генераторов с бойлерной системой утилизации тепла.

Применение котла-утилизатора с подачей в его топку атмосферного воздуха позволяет обеспечивать теплом потребителей тепловой энергии даже при неработающем газомотор-генераторе.

1. Состояние и перспективы тепло-электроснабжения агропромышленных предприятий и фермерских хозяйств / Отчет об информационных исследованиях ГНПП “Метэнергомаш”. – Харьков, 2003. – 63 с.

2. Энергетические установки и окружающая среда / Под общ. ред. В.А.Малыренко. – Харьков: ХГАГХ, 2002. – 398 с.

3. Анализ технического уровня и тенденции развития систем технической диагностики газовых мотор-генераторных установок с искровым зажиганием мощностью 200÷2000 кВт / Отчет об информационных исследованиях ГНПП “Метэнергомаш”. – Харьков, 2003. – 85 с.

4. Генкин К.И. Газовые двигатели. – М.: Машиностроение, 1977. – 196 с.

5. Рекламный проспект АООТ “Первомайскдизельмаш”. – Первомайск, 2004. – 4 с.

6. Мотор-генераторы газовые 11ГД100М. Технические условия ТУЗ-408-76. Харьковский завод им. Малышева. 1976. – 93 с.

7. Справочник эксплуатационника газовых котелен / Под ред. Е.Б.Стоппнера. – Л.: Недра, 1976. – 526 с.

8. Стацкий Л.Р. Кочегар котелен на жидком и газообразном топливе. – М.: Недра, 1964. – 343 с.

Получено 21.07.2004