

УДК 621.436 + 696.42 : 697.386

Л.М. Крутий, Д.С. Шимук, В.М. Приходько

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛА В КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ НА БАЗЕ ГАЗОВОГО МОТОР-ГЕНЕРАТОРА 11ГД100М

В статье приводится сравнительный анализ систем утилизации тепла: бойлерной и с котлом-утилизатором, использующим оставшийся кислород в отработавших газах мотор-генератора.

энергетика, когенерационные установки, утилизация тепла

Введение

Вопрос экономии энергии (тепловой и электрической) для Украины является первостепенным, поэтому задача разработки, создания и внедрения малоэнергоемких технологий и рациональное использование тепловых ресурсов актуальна.

Одним из таких решений является внедрения когенерационных установок на базе газовых мотор-генераторов. В таких установках возможна утилизация тепла систем охлаждения и смазки и тепла, уносимого с отработавшими газами. Тепло возможно утилизировать, применив бойлерную систему или котел-утилизатор с дожигом избыточного кислорода отработавших газов. Необходимо выяснить какая, из этих систем наиболее экономична для конкретной когенерационной установки на базе газового мотор-генератора 11ГД100М и парового котла ДКВР-10-13.

Сразу отметим, что когенерационная установка на базе газового мотор - генератора 11ГД100М и парового котла ДКВР-10-13. не является оптимальным инженерным решением, но такая установка уже создана и принята в эксплуатацию на заводе железобетонных конструкций ЖБК4 город Белгород, Россия [1] то остановимся на ее рассмотрении.

Рассмотрим, выше указанные, два варианта утилизации тепла.

Тепловой баланс газового мотор-генератора 11ГД100М

Тепловой баланс газового мотор-генератора 11ГД100М [2]:

- тепло, внесенное в газовый 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 систему смазки 1152,25 МДж/ч, т.е. 10,94%;
- тепло, унесенное с отработавшими газами 3708,15 МДж/ч, т.е. 35,70%;
- тепло, рассеянное в окружающую среду 431,57 МДж/ч, т.е. 4,10%;
- тепло, преобразованное в электрическую энергию 3817,60 МДж/ч, т.е. 36,24%.

Погрешность теплового баланса составляет 1,63%.

Расход технической воды во втором контуре охлаждения газового мотор-генератора составляет 100 м³/ч при максимально допустимой температуре воды +32 °С.

Температура отработавших газов 400 °С при температуре окружающей среды +20 °С.

Расход природного горючего газа 300 нм³/ч при его низшей теплотворной способности 31,4 МДж/нм³.

Теплотехнические характеристики парового котла ДКВР-10-13

Теплотехнические характеристики парового котла ДКВР-10-13 [3]:

- номинальная теплопроизводительность, Гкал/ч/МДж/ч – 6,3/26,38·10³;
- производительность пара, т/ч – 10;
- избыточного давления пара, кгс/см² – 13;

- температура на выходе экономайзера, °С – 120÷150;
- расчетное значение КПД, % – 90÷92;
- температура питательной воды, °С – 50.

Вариант 1

Утилизация тепла производится в бойлерной при помощи теплообменников (рис. 1). Для упрощения расчетов принято, что теплообменники идеальные, т.е. в них отсутствуют потери при передачи тепла и все подведенное тепло передается теплоносителю. Потребители тепла должны получать воду при температуре не ниже +90 °С.

Бойлерная система утилизации тепла включает в себя теплообменники системы охлаждения и смазки самого газового мотор-генератора 11ГД100М и теплообменник отработавших газов (оборудование бойлерной).

Подогрев воды второго контура за счет тепла системы охлаждения газового мотор-генератора

$$\Delta t_1 = \frac{Q_{ох1}}{C_{H_2O} m_{ТВ}} = \frac{1152,25}{4,19 \cdot 100} = 3,8 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (1)$$

Температура технической воды на выходе из водо-водяного теплообменника газового мотор-генератора

$$t_2 = t_1 + \Delta t = 32 + 3,8 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2)$$

Подогрев воды второго контура за счет тепла масляной системы

$$\Delta t_2 = \frac{Q_M}{C_{H_2O} m_{ТВ}} = \frac{1152,25}{4,19 \cdot 100} = 2,75 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3)$$

Температура воды второго контура на выходе из системы охлаждения газового мотор-генератора

$$t_3 = t_2 + \Delta t_2 = 35,8 + 2,75 = 38,55 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Срабатываемый температурный перепад отработавших газов в бойлерном теплообменнике, при условии, что отработавшие газы на выходе из теплообменника должны иметь температуру порядка $t_{ог2} = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$, чтобы исключить выпадение росы, а на входе $t_{ог} = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$\Delta t_3 = t_{ог1} - t_{ог2} - t_3 = 400 - 120 - 38,55 = 241,45 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5)$$

Количество тепла, переданное технической воде отработавшими газами в бойлерном теплообменнике,

$$\Delta Q_{ог} = Q_{ог} \frac{\Delta t_3}{t_{ог1}} = 3708,15 \frac{241,45}{400} = 2238,33 \text{ МДж/ч}. \quad (6)$$

Подогрев воды второго контура, если ее всю пропускать через бойлерный теплообменник

$$\Delta t_4 = \frac{\Delta Q_{ог}}{C_{H_2O} m_{ТВ}} = \frac{2238,33}{4,19 \cdot 100} = 5,34 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (7)$$

Следовательно, техническая вода будет подогрета до

$$t_4 = t_3 + \Delta t_4 = 38,55 + 5,34 \approx 44 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (8)$$

но не может быть использована для технических целей из-за низких температурных показателей (температура воды для технических целей должна быть порядка 80 – 95 °С). Потому для доведения температуры технической воды до 95 °С при располагаемом количестве тепла отработавших газов необходимо снизить ее расход через бойлерный теплообменник до

$$m_{Т.В. 95^\circ\text{C}} = \frac{\Delta Q_{ог}}{C_{H_2O} \Delta t_5} = \frac{2238,33}{4,19 \cdot 51} = 10,47 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (9)$$

где $\Delta t_5 = t_{\text{вых.Т.В.}} - t_4 = 95 - 44 = 51 \text{ } ^\circ\text{C}$. (10)

Излишек воды второго контура после охлаждения газового мотор-генератора должен сбрасываться в канализацию в объеме

$$m_{Т.В.} = m_{Т.В.} - m_{Т.В. 95^\circ\text{C}} = 100 - 10,47 = 89,53 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (11)$$

и при этом теряется безвозвратно количество тепла

$$Q_{п} = C_{п20} m_{Т.В.}^1 (\Delta t + \Delta t_2) = 4,19 \cdot 89,47 (38 + 2,75) = 2455,46 \text{ МДж/ч}. \quad (12)$$

Подогрев технической воды в когенерационной установке бойлерного типа

$$\Delta t_d = t_{Т.В.2} - t_{Т.В.1} = 95 - 32 = 63 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (13)$$

при $m_{Т.В. 95^\circ\text{C}} = 10,47 \text{ м}^3/\text{ч}$.

В результате подогрева технической воды в когенерационной установке утилизируется количество тепла

$$Q_{у.б} = C_{H_2O} m_{Т.В. 95^\circ\text{C}} \Delta t_d = 4,19 \cdot 10,47 \cdot 63 = 2963,77 \text{ МДж/ч}, \quad (14)$$

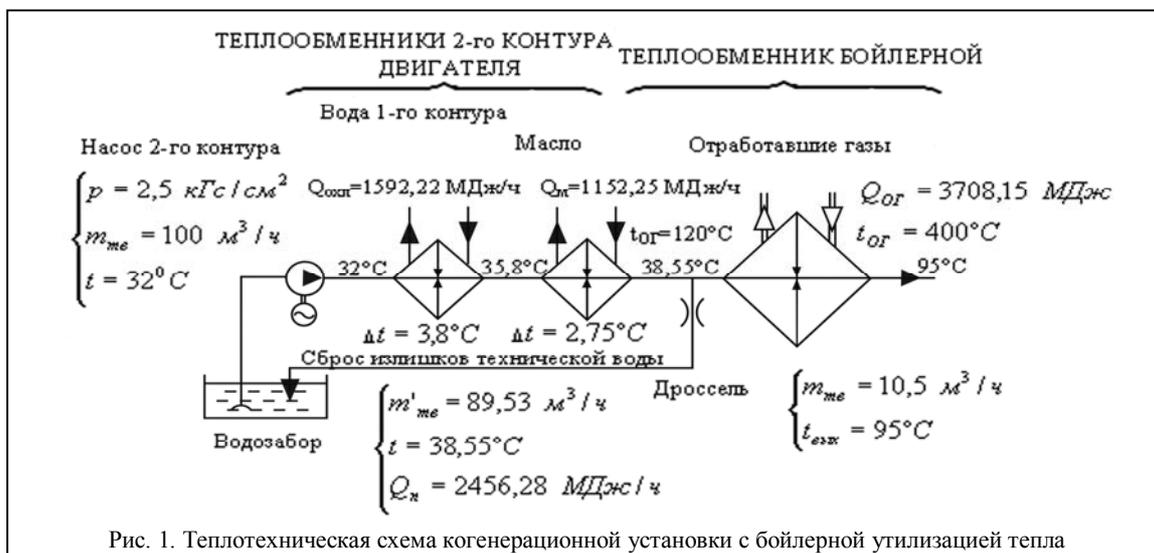


Рис. 1. Теплотехническая схема когенерационной установки с бойлерной утилизацией тепла

и при этом общее количество полезно используемого тепла составляет

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{сг}} + Q_{\text{уб}} = 3817,60 + 2762,77 = 6581,37 \text{ МДж/ч.} \quad (15)$$

Общий коэффициент полезного действия когенерационной установки на базе газового мотор-генератора при бойлерной утилизации тепла

$$\eta_{\text{куб}} = 100 \frac{Q_{\Sigma}}{Q_{\text{вн}}} = 100 \frac{6581,37}{10533,60} = 62,5\% \quad (16)$$

при электрическом КПД

$$\eta_{\Sigma} = 100 \frac{Q_{\text{сг}}}{Q_{\Sigma}} = 100 \frac{9817,60}{10533,60} = 36,24\%, \quad (17)$$

но при этом не используется часть тепла

$$Q_{\text{изб}} = C_{\text{H}_2\text{O}} m'_{\text{в}} (\Delta t_1 + \Delta t_2) = 4,19 \cdot 8,95 (3,8 + 2,75) = 2456,28 \text{ МДж/ч.} \quad (18)$$

Неиспользованность тепла $Q_{\text{изб}} = 2456,3$ МДж/ч объясняется тем, что двигатели типа Д100 морского исполнения и рассчитаны для работы при низкотемпературном режиме, который выбран из условия предупреждения выпадения солей в теплообменниках второго контура.

Если принять, что подогреватель воды емкостью $10,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ имеет КПД 90%, то сочетание бойлерной установки с газовым мотор-генератором позволит экономить газ в количестве

$$\Delta V = \frac{Q_{\text{куб}}}{H_{\text{и}}} = \frac{2963,77}{31,4} = 94,4 \text{ нм}^3/\text{ч.} \quad (19)$$

В данном случае бойлерную установку можно применять для водоснабжения потребителей горячей воды. Для получения пара необходимо дополнительно перегреть воду, что возможно сделать только за счет отработавших газов. При этом возможно получать сырой пар низкого давления с температурой порядка 100°C . Для парообразования одной тонны воды необходимо затратить тепла

$$Q' = 539,6 \cdot 10^6 \text{ кал/Т} = 539,6 \cdot 4,19 = 2260,92 \text{ МДж/м}^3, \quad (20)$$

и на ее подогрев на 5°C

$$Q'' = C_{\text{H}_2\text{O}} m \Delta t_6 = 4,19 \cdot 1 \cdot 5 = 20,95 \text{ МДж/м}^3. \quad (21)$$

Учитывая, что температура отработавших газов на выходе из бойлерного теплообменника должна превышать температуру атмосферного воздуха хотя бы на 110°C , то располагаемое тепло

$$Q_{\text{огр}} = Q_{\text{ог}} \frac{\Delta t_7}{t_{\text{ог}}} = 3708,15 \frac{211,45}{400} = 1960,22 \text{ МДж/ч,} \quad (22)$$

где $\Delta t_7 = 40 - 150 - 38,55 = 211,45^\circ\text{C}$.

Для преобразования необходимо подвести к каждой тонне воды тепла

$$Q'_{\Sigma} = Q' + Q'' = 2260,92 + 20,95 = 2281,87 \text{ МДж/ч.} \quad (23)$$

Следовательно, возможно получать в час пара

$$m_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{огр}}}{Q'_{\Sigma}} = \frac{1960,22}{2281,87} = 0,86 \text{ т/ч.} \quad (24)$$

Очевидно, и расход технической воды через бойлерный теплообменник необходимо снизить до

$0,86 \text{ т}^3/\text{ч}$. В этом случае полезно использование тепла будет

$$Q''_{\Sigma} = C_{\text{H}_2\text{O}} m_{\text{п}} (\Delta t_1 + \Delta t_2) + Q_{\text{огр}} = 4,19 \cdot 0,86 (3,8 + 2,75) + 1960,22 = 1983,82 \text{ МДж/ч.} \quad (25)$$

Коэффициент полезного действия когенерационной установки с системой бойлерной утилизации тепла при получении пара составит

$$\eta_{\text{куб}}^1 = 100 \frac{Q''_{\Sigma} + Q_{\text{сг}}}{Q} = 100 \frac{1960,22 + 3817,60}{10533,60} = 54,85\%. \quad (26)$$

При условии, что парообразование происходит при КПД пароперегревателя 90%, а его паропроизводительность $0,86 \text{ т/ч}$, то при сочетании бойлерной установки с газовым мотор-генератором достигается экономия газа

$$\Delta V^1 = \frac{Q''_{\Sigma}}{H_4} = \frac{1983,82}{31,4} = 63,18 \text{ нм}^3/\text{ч.} \quad (27)$$

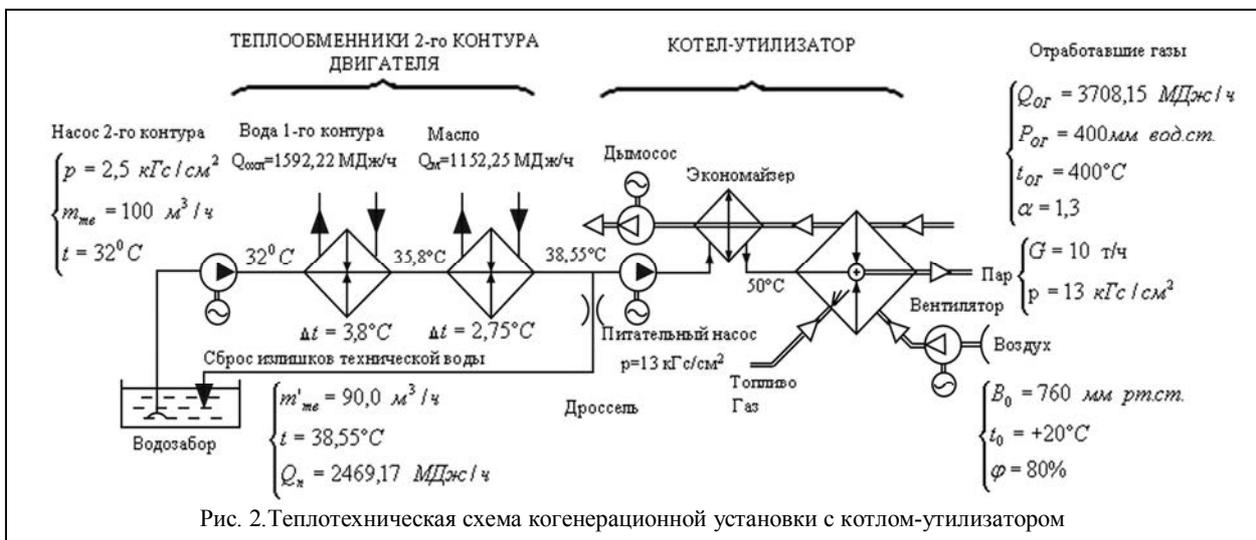
Следовательно, применение когенерационной установки с бойлерной системой утилизации более целесообразно для получения горячей воды ($62,5\%$ или $\Delta V = 94,4 \text{ нм}^3/\text{ч}$), чем пара ($54,85\%$ или $\Delta V = 63,18 \text{ нм}^3/\text{ч}$).

Вариант 2

Утилизацию тепла можно производить при помощи котла-утилизатора. В качестве котла-утилизатора в данном случае используется паровой котел типа ДКВР-10-13, в котором производится дожиг кислорода, входящего в состав отработавших газов двухтактного газового двигателя со щелевой прямой продувкой и электрофакельным воспламенением рабочей смеси. Двухконтурная система охлаждения газового двигателя используется аналогично как при бойлерной утилизации тепла. Отличие заключается лишь в том, что отработавшие газы свое тепло передают не части ($0,86 \text{ м}^3/\text{ч}$) технической воды, а непосредственно вносят его в топку котла, где это тепло совместно с теплом топочных газов передается в водопаровую систему котла (рис. 2).

Газовый мотор 11ГД100М работает с коэффициентом избытка воздуха $\alpha_{\text{мг}} = 2,3$, а паровой котел ДКВР-10-13 – при $\alpha_{\text{к}} = 1,1$. Следовательно, кислорода в отработавших газах достаточно для нормального процесса сгорания горючего газа в топке котла. Этот кислород имеет температуру отработавших газов, т.е. $+400^\circ\text{C}$, при температуре атмосферного воздуха $+20^\circ\text{C}$. Все расчеты ведутся при стандартных атмосферных условиях: барометрические давления $V_0 = 760 \text{ мм.рт.ст.}$, температура $t_0 = 20^\circ\text{C}$ и относительной влажностью воздуха $\phi = 80\%$.

Количество тепла вносимого в паровой котел ДКВР-10-13



$$Q_{\text{к1}} = \frac{Q_{\text{к2}}}{\eta} = \frac{26,38 \cdot 10^3}{0,90 \div 0,92} = (29,51 \div 28,67) \cdot 10^3 \text{ МДж/ч}, \quad (28)$$

что составляет в среднем

$$Q_{\text{пер}} = \frac{Q_{\text{к1min}} + Q_{\text{к1max}}}{2} = \frac{(28,67 + 29,91) \cdot 10^3}{2} = 29 \cdot 10^3 \text{ МДж/ч}. \quad (29)$$

Теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания природного газа, (например Шебелинского месторождения) [4]

$$V_{\text{об}} = 0,0476(2\text{C}_4\text{H}_{10} + 3,5\text{C}_2\text{H}_2 + 5\text{C}_3\text{H}_8 + 6,5\text{C}_4\text{H}_{10} - 2\text{O}_2) = 0,0476(2 \cdot 89,9 + 3,5 \cdot 3,1 + 5 \cdot 0,9 + 6,5 \cdot 0,4 - 0,2 \cdot 1,0) = 9,40 \text{ нм}^3/\text{нм}^3. \quad (30)$$

Здесь приведены объемы газов в процентах, входящие в состав природного газа Шебелинского месторождения. Расход воздуха мотор-генератором при коэффициенте избытка воздуха $\alpha_{\text{мг}} = 2,3$

$$V_{\text{мгв}} = \alpha_{\text{мг}} V_{\text{об}} \frac{Q_{\text{к1}}}{H_{\text{и}}} = 2,3 \cdot 9,40 \frac{10533,60}{31,4} = 7252,8 \text{ нм}^3/\text{ч}. \quad (31)$$

Расход воздуха паровым котлом при коэффициенте избытка воздуха $\alpha_{\text{к}} = 1,1$

$$V_{\text{кб}} = \alpha_{\text{к}} \frac{Q_{\text{к1}}}{H_{\text{и}}} = 1,1 \cdot 9,40 \frac{29000}{31,4} = 95467 \text{ нм}^3/\text{ч}. \quad (32)$$

В топку котла подано кислорода с отработавшими газами при пересчете на атмосферный воздух

$$V_{\text{ког}} = (\alpha_{\text{мг}} - 1) V_{\text{об}} \frac{Q_1}{H_{\text{и}}} = (2,3 - 1) \cdot 9,40 \frac{10533}{31,4} = 4099,4 \text{ нм}^3/\text{ч}, \quad (33)$$

что недостаточно для полного сгорания всего газа, подаваемого в топку котла, при номинальной производительности пара.

Поэтому для полного сгорания топлива, дополнительно необходимо в топку котла подать атмосферный воздух в объеме

$$\Delta V_{\text{кб}} = V_{\text{кб}} - V_{\text{ког}} = 9549,7 - 4099,4 = 5450,3 \text{ нм}^3/\text{ч}, \quad (34)$$

что составляет

$$\gamma = 100 \frac{\Delta V_{\text{кб}}}{V_{\text{кб}}} = 100 \frac{5450,3}{9549,7} = 57,1\%. \quad (35)$$

С 42,9% кислорода поданного в топку котла вносится дополнительно тепла

$$Q_{\text{огк}} = Q_{\text{ог}} \frac{t_{\text{ог}} - t_{\text{ог2}} - t_0}{t_{\text{ог}}} = 3708,15 \frac{400 \cdot 120 + 20}{400} = 2410,3 \text{ МДж/ч}. \quad (36)$$

Для обеспечения полной производительности котла (6,3 Гкал/ч) в топку котла необходимо еще дополнительно внести тепло путем сжигания дополнительно количества газа

$$Q_{\text{к1}} = Q_{\text{кер}} - Q_{\text{огк}} = 29000 - 2410,3 = 26589,7 \text{ МДж/ч}. \quad (37)$$

В котел подается питательная вода подогретая во втором контуре газового мотор-генератора до температуры $t_3 = 38,55^\circ\text{C}$ в количестве $10 \text{ м}^3/\text{ч}$, поэтому с питательной водой в котел-утилизатор вносится дополнительное тепло

$$\Delta Q_{\text{кТВ}} = C_{\text{H}_2\text{O}} m_{\text{п}} (t_3 - t_0) = 4,19 \cdot 10 (38,55 - 20) = 777,2 \text{ МДж/ч}. \quad (38)$$

Но так как при подогреве питательной воды используется только часть тепла из общего тепла, внесенного в котел, то необходимо вычитать тепло внесенное в котел с питательной водой. В этом случае в когенерационную установку вносится тепло

$$Q'_{\text{y1}} = Q_{\text{мг1}} + Q_{\text{к1}} - Q_{\text{огк}} - \Delta Q_{\text{кТВ}} = 10533,6 + 29000 - 2410,3 - 777,2 = 36946,1 \text{ МДж/ч}, \quad (39)$$

которое соответствует сжиганию газа в объеме

$$V_{\text{y}} = \frac{Q'_{\text{y1}}}{H_{\text{и}}} = \frac{36946,1}{31,4} = 1157,5 \text{ нм}^3/\text{ч}. \quad (40)$$

Расход газа при раздельной работе газового мотор-генератора и парового котла составляет газовым мотором 11ГД100М

$$V_{\text{мг}} = \frac{Q_{\text{мг1}}}{H_{\text{и}}} = \frac{10533,6}{31,4} = 335 \text{ нм}^3/\text{ч} \quad (41)$$

и паровым котлом ДКВР-10-13

$$V_{к1} = \frac{Q_{кер}}{H_{и}} = \frac{29000}{31,4} = 923,6 \text{ нм}^3/\text{ч}, \quad (42)$$

т.е. суммарный расход газа будет

$$V_{\Sigma} = V_{мг} + V_{к1} = 335,5 + 923,6 = 1259,1 \text{ нм}^3/\text{ч}. \quad (43)$$

т.е. экономия газа при применении когенерационной установки с котлом-утилизатором составит

$$\Delta V_y = V_{\Sigma} - V_y = 1259,1 - 1157,5 = 101,6 \text{ нм}^3/\text{ч}, \quad (44)$$

т.е.
$$\gamma = 100 \frac{\Delta V_y}{V_{\Sigma}} = 100 \frac{101,6}{1259,1} = 8,1\%. \quad (45)$$

Следовательно, коэффициент полезного действия когенерационной установки с котлом-утилизатором достигает

$$\eta_{куку} = 100 \frac{Q_{сг} + Q_{к}}{Q_{y1}} = 100 \frac{381,67 + 26380,0}{36946,1} = 81,7\%. \quad (46)$$

Выводы

Когенерационная установка для получения пара на базе двухтактного газового мотор-генератора с

целевой прямоточной продувкой и с утилизацией тепла в паровом котле-утилизаторе типа ДКВР-10-13 с дожигом кислорода, входящего в состав отработавших газов газового мотора, более экономичные (КПД 81,7%), чем когенерационная установка с бойлерной системой утилизации тепла (КПД 54,85%). Поэтому целесообразно применять установку с котлом-утилизатором, что позволяет экономить 101 нм³ газа в час, когда при бойлерной системе утилизации тепла достигается экономия только 63,2 нм³ газа в час.

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. Мотор-генераторы газовые 11ГД100М. ТУ я ТУЗ-408-76. – Х.: Харьковский завод им. Малышева, 1976. – 93 с.
3. Стацкий Л.Р. Кочегар котельных на жидком и газовом топливе. – М.: Наука, 1964. – 343 с.
4. Справочник эксплуатационника газовых котелен / Под ред. Е.Б. Столнера. – Л.: Недра, 1976. – 526 с.

Поступила в редколлегию 2.02.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.