

УДК 621.3

УМЕНЬШЕНИЕ ПОТЕРЬ КОТЛОАГРЕГАТА С УХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

Павловская А.А.

Научный руководитель – старший преподаватель Романко В.А.

Экономичность современных теплоэнергетических установок определяется экономичностью ее составных элементов. Котельная установка является основным оборудованием ТЭС, а потери с уходящими дымовыми газами составляют наибольший процент в тепловом балансе и составляют 5-8% располагаемого тепла. С понижением температуры уходящих газов на 12-15°C потери тепла уменьшаются на 1% [1]. Величина данных потерь зависит от температуры уходящих дымовых газов и их объема. Кроме того, высокая температура уходящих дымовых газов оказывает негативный эффект на экологию, так как приводит к тепловому загрязнению окружающей среды.

Для снижения потерь теплоты с уходящими дымовыми газами на данный момент могут быть использованы тепловые насосы или конденсационные экономайзеры. Также для утилизации теплоты уходящих дымовых газов могут быть использованы промышленные установки, в которых теплота используется в технологическом цикле предприятия. При этом уходящие газы используются для сушки, но предприятие, технология которого позволяет использовать дым газы в технологическом цикле, должно находиться в непосредственной близи от ТЭС.

На данный момент установки, использующие теплоту уходящих дымовых газов используются преимущественно для выработки дополнительной тепловой энергии.

ООО "ИИЦ "Стирлинг-технологии" предлагает вариант реализации технологии перевода котельных в мини-ТЭЦ, при котором электрическая мощность вырабатывается за счет преобразования теплоты уходящих дымовых газов в полезную механическую и электрическую энергию.

Двигатель Стирлинга представляет собой двигатель внешнего сгорания. Принцип действия двигателя Стирлинга основан на периодическом нагреве и охлаждении рабочего тела с извлечением энергии из возникающего при этом изменения объема рабочего тела. Электрический КПД данного двигателя приближается к 30%, а тепловой составляет около 30-35%.

Для передачи теплоты дымовых газов к двигателю Стирлинга его нагреватель установлен в дымоходе котельной установки. В двигателе Стирлинга теплота дымовых газов преобразуется в полезную механическую энергию, которая передается на электрогенератор для получения электроэнергии.

Это позволяет выработать дополнительную электрическую энергию, снизить стоимость и повысить эффективность теплоэнергетической системы или осуществить перевод паровой котельной в мини-ТЭЦ.

Кроме того, при установке двигателя Стирлинга в газоходе котла снижается стоимость вырабатываемой электроэнергии, повышается экономичность котлоагрегата, наблюдается положительный экологический эффект, связанный с уменьшением теплового загрязнения.

Для достижения данного технического результата когенерационная система на основе паровой котельной установки с использованием теплоты уходящих газов, состоящая из парового котла, паровой турбины с компрессором для дымовых уходящих газов на одном валу, линии потребителя пара, конденсатора пара, линии конденсата, циркуляционного насоса и линии подпиточной воды насоса, снабжена электрогенератором, установленным на одном валу с турбиной, вторым электрогенератором, установленным на одном валу с двигателем Стирлинга, нагреватель которого размещен в дымоходе котельной установки, системой внешнего теплоснабжения, проходящей через конденсатор, теплообменником-подогревателем в линии конденсата, через который проходят дымовые уходящие газы, при

этом дымовые уходящие газы последовательно проходят через нагреватель двигателя Стирлинга и теплообменник-подогреватель [2].

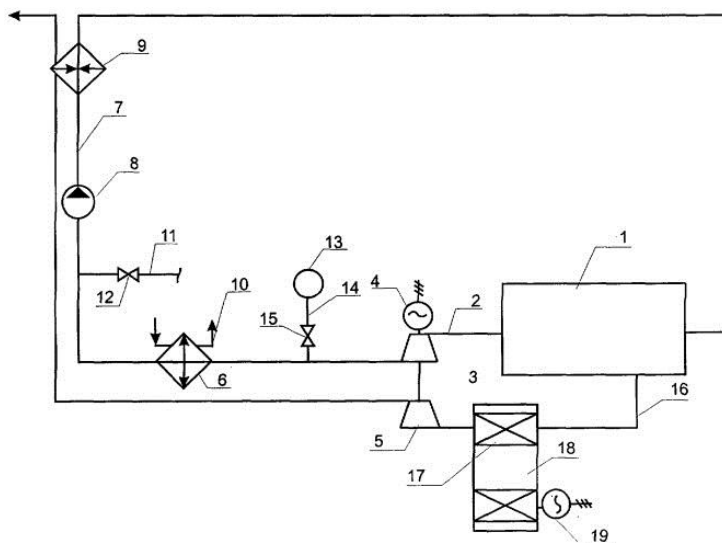


Рисунок 2 – Схема утилизации тепла уходящих газов с применением двигателя Стирлинга

На рисунке 1 изображена принципиальная схема системы на основе паровой котельной установки с использованием теплоты уходящих газов. Данная схема включает в себя паровой котел 1, линию пара 2 с расположенными на ней паровой турбиной 3 с электрогенератором 4 и компрессором уходящих дымовых газов 5 на одном валу, конденсатор пара 6, линию конденсата 7 с циркуляционным насосом 8 и теплообменником-подогревателем 9. Для снятия тепловых нагрузок предусмотрена система внешнего теплоснабжения 10, проходящая через конденсатор 6.

К линии конденсата 7 подведена линия подпиточной воды 11 с регулирующим вентилем 12. От основной линии пара 2, после турбины 3, к потребителю пара 13 проведена линия 14 с регулирующим вентилем 15.

В дымоходе 16 котельной установки 1 установлен нагреватель 17 двигателя Стирлинга 18. На одном валу с двигателем Стирлинга 18 установлен электрогенератор 19.

Пар из котла паровой линии 2 поступает в паровую турбину 3, где, расширяясь, совершает полезную работу, преобразуемую в электрическую энергию с помощью электрогенератора 4, расположенного на одном валу с турбиной 3. Часть механической энергии от турбины 3 расходуется на привод компрессора 5 для повышения давления уходящих дымовых газов. Из турбины 3 пар поступает в конденсатор 6, где конденсируется, а затем конденсат по линии 7 насосом 8 подается в теплообменник-подогреватель 9. Из линии 11 через регулировочный вентиль 12 в линию конденсата поступает подпиточная вода. В подогревателе 9 происходит нагрев смеси конденсата и подпиточной воды за счет теплообмена с уходящими дымовыми газами. Теплоноситель системы внешнего теплоснабжения 10 поступает в конденсатор 6, где за счет теплообмена конденсируются водяные пары после выхода из турбины 3, а теплоноситель нагревается. От паровой линии 2, после турбины 3, к потребителю пара 13 проведена линия 14 с регулирующим вентилем 15.

Для передачи теплоты дымовых газов к двигателю Стирлинга 18 его нагреватель 17 установлен в дымоходе 16 котельной установки. В двигателе Стирлинга 18 теплота дымовых газов преобразуется в полезную механическую энергию, которая передается на электрогенератор 19 для получения электроэнергии.

Наиболее выгодным оказывается вариант, когда подвод теплоносителя к нагревателю осуществляется через нагревательные трубки, находящиеся непосредственно в газоходе котла и напрямую воспринимающие тепло.

Также для ТЭС возможен вариант, когда двигатель Стирлинга напрямую воспринимает тепло пламени горящего топлива из общей камеры сгорания. Для наиболее эффективного получения механической (электрической) энергии с помощью двигателя Стирлинга существуют разработки, предлагающие вместо котельной установки использовать прямоугольной формы общую камеру сгорания, по бокам которой устанавливаются агрегаты двигателя Стирлинга с нагревателями внутри камеры сгорания. Нагреватель или трубки нагревателя напрямую воспринимают инфракрасное и световое излучение раскаленных газов.

Отверстия в камере сгорания герметически закрываются (задвижками изнутри, привод снаружи) на время ремонта или осмотра двигателя Стирлинга, которые устанавливаются на рельсах, по которым подкатываются к камере сгорания.

Еще одним преимуществом двигателя Стирлинга является простота регулирования, что позволяет ему участвовать в регулировании графика электрических нагрузок.

Потребление электроэнергии в течение суток очень неравномерно, а изменить режим работы паровой турбины нелегко, так как пар аккумулирует большое количества тепла и для его охлаждения нужно много времени. Турбина после остановки может провисать, пока не остыла, поэтому требует проворачивания. Сама турбина дорогостоящее и сложное оборудование.

Даже парогазовый цикл предполагает повышение КПД всего на 6-8% и снижение капвложений на 25% по сравнению с паротурбинными установками.

С технологией, основанной на применении двигателя Стирлинга нагрузка в часы провалов сокращается: снижением давления рабочего тела в рабочих полостях двигателя, снижением температуры в камере сгорания, уменьшением теплообмена в холодильнике.

В рассматриваемом примере двигатель Стирлинга установлен в дымоходе парогенератора ТГМЕ-206 и вырабатывает 35 кВт электроэнергии, понижая температуру уходящих дымовых газов котлоагрегата от 145 °С до 84 °С.

Уменьшение температуры уходящих дымовых газов означает уменьшение слагаемого q_2 в тепловом балансе парогенератора. Зависимость данных величин определяется соотношением 1:

$$q_2 = (3,52 \cdot \alpha_{yx} + 0,63)(T_{yx} - (\alpha_{yx} \cdot t_{xb})) / (\alpha_{yx} + 0,18) \cdot A_t \cdot K_q \cdot 10^{-2}, \% \quad (1)$$

где $\alpha_{yx} = 1,32$ – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах при максимальной нагрузке котла ТГМЕ-206 при работе на природном газе [3];

T_{yx} – температура уходящих дымовых газов, °С;

$t_{xb} = +15$ °С – температура холодного воздуха на всасе дутьевого вентилятора. Принимается среднегодовая температура по форме 3-ТЕХ по данным ТЭЦ;

$K_q = 0,995$ – коэффициент, учитывающий тепло внесенное в топку воздухом, подогретым в калориферах [3];

A_t – коэффициент, учитывающий изменение теплоемкости продуктов сгорания в зависимости от температуры уходящих дымовых газов. Рассчитывается по формуле 2:

$$A_t = 1 + 0,013 \cdot (T_{yx} - 150) / 100. \quad (2)$$

Коэффициент A_t после установки двигателя Стирлинга перед дымососом будет равен:

$$A_t = 1 + 0,013 \cdot (120 - 150) / 100 = 0,996$$

Потери тепла с уходящими дымовыми газами q_2 после модернизации составят:

$$q_{2\text{мод}} = (3,52 \cdot 1,32 + 0,63)(120 - (1,32 \cdot 15)) / (1,32 + 0,18) \cdot 0,996 \cdot 0,995 \cdot 10^{-2} = 5,6\%.$$

Согласно данным Гомельской ТЭЦ-2, фактическое значение потерь теплоты с уходящими дымовыми газами $q_{2\text{факт}}$ для котла ТГМЕ-260 №1 при работе на природном газе и нагрузке в 100% равно 6,91%. Таким образом уменьшение потерь тепла с уходящими газами Δq_2 составит (формула 3):

$$\Delta q_2 = q_{2\text{факт}} - q_{2\text{мод}}, \% \quad (3)$$

$$\Delta q_2 = 6,91 - 5,6 = 1,31\%.$$

Часовой расход топлива на котел $B_{\text{усл}}$ составляет 68,6 т у.т./ч, а среднее число часов работы энергоблока τ – 5230 часов в год [3]. Тогда годовой расход в тоннах условного топлива составит (формула 4):

$$B_{\text{усл}}^{\text{год}} = B_{\text{усл}} \cdot \tau, \text{ т у.т./год.} \quad (4)$$

$$B_{\text{усл}}^{\text{год}} = 68,6 \cdot 5230 = 358778 \text{ т у.т./год.}$$

Экономия топлива от уменьшения потерь с уходящими дымовыми газами (ΔB) найдем по формуле 5:

$$\Delta B = B_{\text{усл}}^{\text{год}} \cdot \Delta q_2 / \eta_{\text{к}}^{\text{н}}, \quad (5)$$

где $\eta_{\text{к}}^{\text{н}} = 88,48\%$ – КПД нетто котельной установки [3].

$$\Delta B = 358778 \cdot 1,31 / 88,48 = 5311,9 \text{ т у.т./год.}$$

Годовая выработка электроэнергии двигателем Стирлинга мощностью 35 кВт будет равна (формула 6):

$$\mathcal{E}_{\text{в}} = N \cdot \tau, \text{ кВт}\cdot\text{ч/год,} \quad (6)$$

где $N = 35$ кВт – мощность двигателя Стирлинга;
 $\tau = 5230$ – среднее число часов работы энергоблока.

$$\mathcal{E}_{\text{в}} = 35 \cdot 5230 = 183050, \text{ кВт}\cdot\text{ч/год.}$$

При этом стоимость сэкономленного топлива (формула 7):

$$C_{\text{т}} = \Delta B \cdot C_{\text{т у.т.}}, \text{ руб.,} \quad (7)$$

где $C_{\text{т у.т.}} = 4884,58$ тыс.руб./т или 488 руб.46 коп. деноминированных белорусских рублей.

$$C_{\text{т}} = 5311,9 \cdot 4884,58 = 25946,4 \text{ млн. руб.}$$

или 2594,64 тыс. деноминированных рублей.

Срок окупаемости данной модернизации будет рассчитываться исходя из стоимости самого двигателя и затрат на его установку и наладку. Также на данный момент в Беларуси отсутствует серийное производство двигателей Стирлинга. Зарубежными организациями предоставляются данные проекты, они так же большинство аппаратов изготавливают под заказ и по индивидуальному проекту, это обстоятельство также значительно влияет на стоимость данной установки. На данный момент по приблизительным оценкам стоимость внедрения двигателя Стирлинга составляет от 2000 до 36 000 \$/кВт (т.е. максимум 817,88 млн.руб./кВт или 81,788 тыс./кВт деноминированных руб.).

Следовательно, срок окупаемости мероприятия ориентировочно составит 14 месяцев.

Литература

1. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. Под ред. Д.М. Хзмаляна. Учебное пособие для студентов высш. учеб. заведений. – М.: Энергия: 1976. – 488 с. с ил.
2. Пат. 2278279 RU, МПК F01K3/20 (2006.01). Когенерационная система на основе паровой котельной установки с использованием теплоты уходящих газов / Ковалёв В. В., Кириллов Н.Г. Ковалёв Д.В.; заявитель и патентообладатель Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского Министерства обороны РФ. - № 2004112207/06; заявл. 21.04.04; опубл. 20.06.06.
3. Нормативные энергетические характеристики Гомельской ТЭЦ-2. Том 1.