

УДК 621.311

Методические особенности исследования энергетической эффективности комбинированной мини-ТЭС на базе газопоршневой установки и паровой турбины

П.А. Щинников, Н.В. Марасанов

Новосибирский государственный технический университет

E-mail: nikmarasanov@gmail.com

Рассматривается технология производства электроэнергии на комбинированной мини-ТЭС, работающей при сочетании циклов Отто и Ренкина. Представлены основные положения методики исследования. Показано, что конструктивно-компоновочные параметры всех основных энергетических элементов, присущих разработанной технологии, позволяют выполнить ее в блочно-модульном варианте, а КПД по отпуску электроэнергии по предлагаемой технологии составит не менее 50 %.

Ключевые слова: цикл Ренкина, цикл Отто, КПД, мини-ТЭС, энергопоток.

Одним из путей развития энергетики является ее децентрализация. К децентрализованным системам принято относить так называемые распределенные энергетические установки. Более того, в настоящее время используется термин «суверенная генерация», относящийся к установкам и подчеркивающий не только их автономность, но и независимость как в техническом, так и в хозяйственном плане. Такого плана генерирующие мощности устанавливают собственники, чтобы обособиться от централизованного энергоснабжения. В этой связи актуальной проблемой для современной энергетики становится повышение эффективности топливоиспользующих энергетических установок для распределенной генерации. Часто в качестве таких установок используются газопоршневые машины, работающие по циклу Отто [1–3]. Для них более широкие возможности повышения электрической эффективности открываются при дополнении цикла Отто циклом Ренкина. Некоторым аналогом такой технологии может являться парогазовый энергоблок. Такая комбинация позволяет значительно повысить коэффициент использования теплоты топлива не за счет когенерации (дополнительным отпуском теплоты), а путем выработки дополнительной электроэнергии в паросиловом цикле. В этом случае параметры паросилового цикла Ренкина будут обусловлены температурой уходящих из газопоршневой установки (ГПУ) газов. При комбинировании циклов Отто и Ренкина в установке на базе, например, двигателя Jenbacher JMS 620 GS (одна из наиболее распространенных в мире ГПУ) параметры паросилового цикла имеют значения: $P_0 = 39$ бар, $t_0 = 400$ °С, $h_0 = 3216$ кДж/кг, что при давлении конденсации $P_k \approx 0,1$ бар позволит обеспечить располагаемый теплоперепад на паровую турбину $H_0 = 1064$ кДж/кг.

Выбор начальных параметров паросилового цикла в общем случае должен определяться на основе оптимизационных решений с учетом их достижимости и технической возможности изготовления оборудования по заданному критерию, например, максимальной эффективности, прибыли или рентабельность установки. В настоящей работе параметры приняты по условию их технической достижимости.

Тепловая схема комбинированной мини-ТЭС представляет собой последовательно включенные агрегаты основного теплосилового оборудования в виде газопоршневой установки, котла-утилизатора (КУ) и паровой турбины (ПТ) с обратными связями, обеспечиваемыми конденсатором (К) и деаэратором (Д), а также подогревателем основного конденсата за счет утилизации теплоты, отводимой с водой от контура охлаждения ГПУ (рис. 1).

Отработавшие в газопоршневой установке газы поступают в котел-утилизатор, где генерируют пар высоких параметров, который направляют в паровую турбину. Пар, совершив работу в паровой турбине, поступает в конденсатор, где обеспечивается процесс его конденсации (рис. 1), затем конденсатным насосом основной конденсат направляют в деаэратор. Перед поступлением в деаэратор основной конденсат нагревают в подогревателе до $84\text{ }^{\circ}\text{C}$ за счет утилизационного контура охлаждения собственно ГПУ, при этом используется весь поток охлаждающей ГПУ воды. В деаэраторе обеспечивается очистка от газов основного конденсата и одновременный его нагрев за счет отбора пара из паровой турбины. Для обеспечения постоянства давления деаэрации установлена редуциционно-охладительная установка (РОУ). После деаэратора питательным насосом (ПН) вода с температурой $111\text{ }^{\circ}\text{C}$ направляется в котел-утилизатор. Дымовые газы после котла-утилизатора выбрасываются с температурой на уровне $167\text{ }^{\circ}\text{C}$ через дымовую трубу в окружающую среду. К основным параметрам, приведенным на рис. 1, относятся: t_0 , P_0 , h_0 , G_0 — температура, давление, энтальпия и расход острого пара; t_{0T} , P_{0T} — температура и давление пара в нерегулируемый отбор; t_k , P_k , h_k — температура, давление и энтальпия конденсата; $t_{ок}$, $t_{пв}$, t_{yx} , t_r , $t_{тр}$, $t_{обр}$ — температуры основного конденсата, питательной воды, уходящих газов, газов на выходе из цилиндров, прямой и обратной

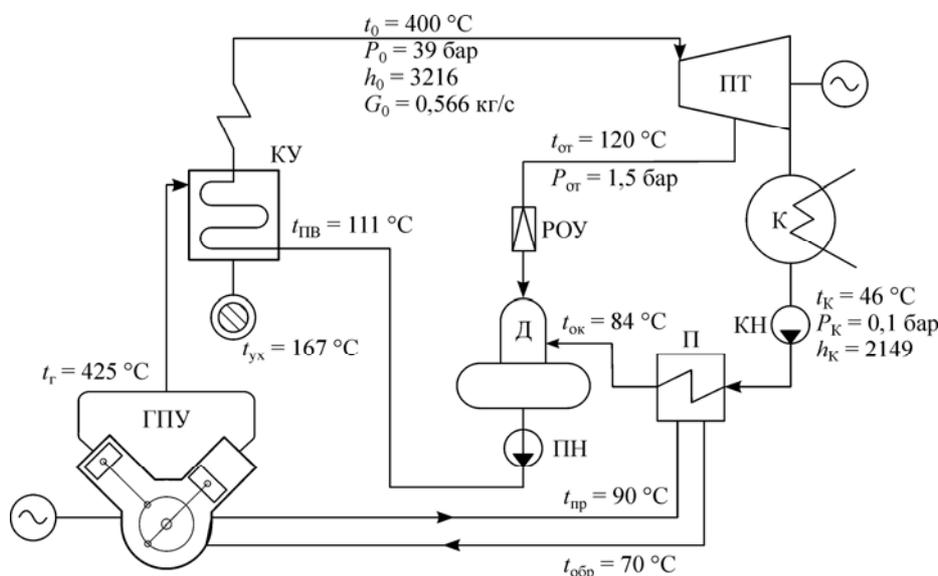


Рис. 1. Схема мини-ТЭС с основными параметрами рабочих сред.

ГПУ — газопоршневая установка, КУ — котел-утилизатор, ПТ — паровая турбина, К — конденсатор, П — подогреватель, Д — деаэратор, КН — конденсатный насос, ПН — питательный насос, РОУ — редуциционно-охладительная установка.

воды соответственно.

Котел-утилизатор представляет собой конструкцию барабанного типа с принудительной циркуляцией и с тремя группами поверхностей нагрева: пароперегревателем, испарителем и водяным экономайзером. С использованием положений нормативного метода для теплового расчета котлов [4] определяются параметры рабочих тел во всех узловых точках КУ. При этом энтальпия перегретого пара является функцией его термодинамических параметров:

$$h_{\text{пп}} = f(t_{\text{пп}}; P_{\text{пп}}). \quad (1)$$

Коэффициент теплопередачи имеет вид

$$k = \frac{1}{1/\alpha_{\Sigma} + \xi}, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}), \quad (2)$$

где α_{Σ} — суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением, ξ — тепловое сопротивление отложений на трубах. Связь поверхностей нагрева и теплового потока, отданного дымовыми газами, определяется формулой

$$Q_{\text{пп}} = kF_{\text{пп}} \cdot \Delta t_{\text{пп}},$$

здесь $Q_{\text{пп}}$ — теплота, переданная пару дымовыми газами в пароперегревателе, кВт, k — коэффициент теплопередачи, $F_{\text{пп}}$ — поверхность нагрева пароперегревателя, м^2 ; $\Delta t_{\text{пп}}$ — среднелогарифмический температурный напор. Аналогичным образом устанавливаются взаимосвязи между поверхностями нагрева и тепловым потоком для испарителя и водяного экономайзера. Результатом вычислений являются конструктивно-компоновочные характеристики КУ.

Расчет паровой турбины проводится методом, предложенным в работе [5]. При этом последовательно определяются внутренние относительные коэффициенты полезного действия первой ступени и отсеков турбины, работающих в зонах перегретого и влажного пара. Электрическая мощность турбины запишется в виде

$$N = G_0 H_0 \eta_{0i} / m, \quad \text{кВт},$$

где H_0 — располагаемый теплоперепад на турбину, кДж/кг, η_{0i} — внутренний относительный КПД турбины, m — поправочный коэффициент, учитывающий недовыработку электроэнергии паром в нерегулируемом отборе.

Конструкторский расчет котла-утилизатора и паровой турбины позволяет оценить габаритные характеристики установок для мини-ТЭС на базе ГПУ Jenbacher JMS 620 GS. Все оборудование возможно изготовить в блочно-модульной компоновке, так как его размеры невелики и составляют (длина×ширина×высота) 11,4×5×6 м для котла-утилизатора и 1,4×1,2×1,5 м — для паровой турбины.

Совместно с конструкторскими расчетами проводят расчет энергопотоков для мини-ТЭС в целом. При этом всем входным потокам энергии в элемент установки соответствуют все выходные потоки с учетом потерь:

$$\sum Q_{\text{вх}} = \sum Q_{\text{вых}} + \sum Q_{\text{пот}},$$

где $Q_{\text{вх}}$, $Q_{\text{вых}}$ — энергетические потоки на входе и выходе из установки или из ее элемента, кВт; $Q_{\text{пот}}$ — энергетические потери, кВт.

На рис. 2 приведена диаграмма энергетических потоков для рассматриваемой установки, из которой видно, что КПД по отпуску электроэнергии для нее составляет 50 %. Следует отметить, что данное значение КПД оценочное и получено без проведения

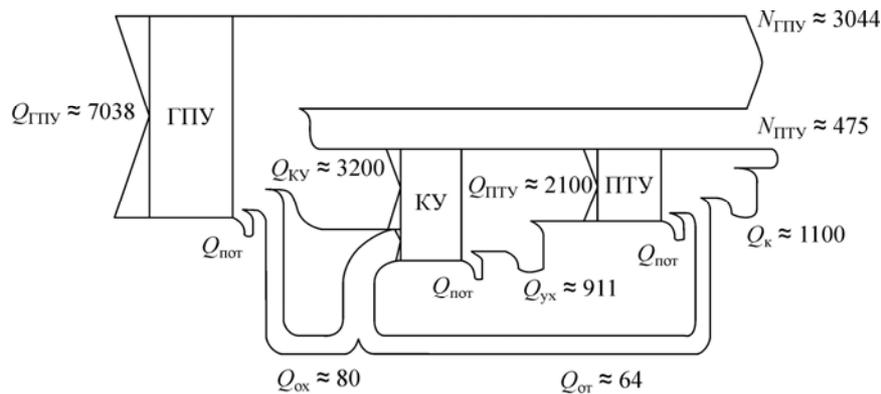


Рис. 2. Диаграмма энергетических потоков.

$N_{ГТУ}$, $N_{СТУ}$ — электрическая мощность ГТУ и паротурбинной установки (СТУ) соответственно,
 $Q_{ГТУ}$ — подведенный с топливом к установке тепловой поток;
 $Q_{КУ}$, $Q_{СТУ}$ — подведенный к котлу-утилизатору и паровой турбине тепловой поток;
 $Q_{ок}$, $Q_{от}$ — тепловой поток от охлаждающего ДВС контура и из нерегулируемого отбора соответственно,
 $Q_{ух}$ — тепловой поток с уходящими газами, $Q_{к}$ — тепловой поток с охлаждающей конденсатор водой,
 $Q_{пот}$ — тепловые потери в элементах установки;
 цифрами показаны количественные оценки энергетических потоков в кВт.

каких-либо процедур оптимизации термодинамических, расходных и конструктивно-компоновочных параметров. Расход условного топлива для установки составит 0,246 кг/кВт·ч.

Таким образом, в настоящей работе представлена технология производства электроэнергии на комбинированной мини-ТЭС, работающей при сочетании циклов Отто и Ренкина, и положения методики ее исследования, заключающейся в определении основных термодинамических, расходных и конструктивно-компоновочных характеристик оборудования для такой технологии на базе ГТУ Jenbacher JMS 620 GS. Показано, что все основные элементы технологии, а именно: ГТУ, котел-утилизатор и паровая турбина могут быть выполнены в блочно-модульной компоновке. Показано, что КПД по отпуску электроэнергии для предложенной технологии составит не менее 50 % даже без учета оптимизационных решений по термодинамическим, расходным и конструктивно-компоновочным параметрам и характеристикам.

Список литературы

1. Филиппов С.П. Малая энергетика в России // Теплоэнергетика. 2009. № 8. С. 38–44.
2. Щинников П.А., Бородихин И.В., Ноздренко Г.В. Комбинированная технология теплоснабжения на комбинированном жидком топливе с применением внутриквартальных двигателей внутреннего сгорания // Новости теплоснабжения. 2002. № 7. С. 47–49.
3. Шадек Е.Г. Тригенерация как технология экономии энергоресурсов // Энергосбережение. 2015. № 2. С. 52–57.
4. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. 3-е изд. СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
5. Щинников П.А. Проектирование одноцилиндровой конденсационной турбины: уч. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. 83 с.

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2016 г.,
 после доработки — 7 декабря 2016 г.