Зародов Е.А., Кишалов А.Е.

**Сравнение экономической эффективности различных методов
децентрализованной выработки тепловой и электрической энергии**

*ФГБОУ Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет
(Россия, Уфа)*

doi:10.18411/lj-09-2018-96

idsp: 000001:lj-09-2018-96

Аннотация

В статье описана энергетическая установка малой мощности для совместной выработки тепловой и электрической энергии. Источником тепловой энергии является водогрейный котёл. Для производства электроэнергии используется паротурбинная установка, работающая по органическому циклу Ренкина, где в качестве рабочего тела используется фреон R123. Рассмотрены варианты установки, при использовании различных видах топлива (условное топливо, природный газ, пеллеты). В статье рассчитываются затраты топлива на производство 1 кВт·ч тепловой и электрической энергии и сравниваются с аналогичными показателями установок Capstone C-30, дизельным генератором Kipor KDE6500E и покупкой тепловой и электрической энергии по тарифам для населения в РБ. Рассчитываются и сравниваются годовые затраты для различных методов когенерации тепловой и электрической энергии.

Ключевые слова: энергетика; децентрализация; органический цикл Ренкина; фреон; природный газ; пеллеты; условное топливо; теплоснабжение; электроснабжение.

Основной целью энергетики является обеспечение всех конечных потребителей требуемым количеством тепловой и электрической энергией. Исторически сложилось, что в России порядка 99% электрической и тепловой энергии производится на крупных энергетических станциях и теплоцентралях. При этом существуют потери при трансформации и передачи энергии, особенно на дальние расстояния. Доставка тепловой энергии сопровождается гидравлическими сопротивлениями, утечками пара и рассеиванием теплоты в окружающую среду. Одним из методов решения данной проблемы является децентрализованное производство тепловой и электрической энергии непосредственно вблизи мест её потребления. С помощью децентрализации возможно удешевить производство энергии для конечного потребителя, обеспечить энергией труднодоступные объекты, создать резервное электро- и теплоснабжение при необходимости. В России для децентрализованной выработки электрической энергии зачастую используются электрогенераторы, приводящиеся во вращение ДВС на жидком топливе (бензин, керосин, дизель). При производстве тепловой энергии в основном применяются электрические и газовые котлы. В данной работе описывается маломощная энергоустановка для децентрализованной выработки тепловой и электрической энергии. Затраты на производство энергии сравниваются с другими методами получения энергии.

Предлагаемая система для выработки тепловой и электрической энергии содержит водогрейный котёл, в котором вода системы отопления (С.О.) нагревается до температуры порядка 70–95°C (первый контур). Во втором контуре циркулирует низкокипящее рабочее тело (фреон R123), который нагревается, испаряется и перегревается до температуры 310°C. Перегретое рабочее тело подаётся в турбину, к которой присоединён электрогенератор (рисунок 1). Расширившийся в турбине фреон поступает в конденсатор, где конденсируется при постоянном давлении порядка 0,07 МПа, затем проходит в насос (который поднимает давление фреона до 4,0 МПа) и далее рабочее тело подается обратно в котёл. Переменный ток с переменной частотой, вырабатываемый электрогенератором, выпрямляется, а затем преобразуется в переменный с частотой 50 Гц. Для компенсации резкого повышения нагрузки в системе предусмотрен аккумулятор, который заряжается при спадах нагрузки и разряжается при

пиковых нагрузках. В качестве конденсатора используется теплообменник, в котором теплота, выделенная при конденсации рабочего тела, отводится в окружающую среду при соответствующем температурном уровне.

Рисунок 1. Общая схема энергоустановки на основе ОЦР, где 1 – котёл; 2 – турбина; 3 – генератор; 4 – конденсатор; 5 – насос

На рисунке 2 представлен термодинамический цикл Ренкина, изображенный на t - s диаграмме фреона R123. Особенностью реализации цикла является парообразование и перегрев рабочего тела при сверхкритическом давлении (минуя двухфазную область). В результате проведённого термодинамического расчёта были определены оптимальные параметры цикла. Термический КПД данного цикла варьируется в диапазоне от 23,6% до 25,4%, в зависимости от времени года. В расчётах КПД котла принят равным 90%.

Рисунок 2. ОЦР фреона R123 в T - s координатах

Значение начальных параметров перед турбиной (т. 1, рисунок 2) ограничено теплофизическими свойствами фреона R123, противодавление (т. 2–3, рис. 2) определяется параметрами холодного источника ($t^3 = +4...+180^\circ\text{C}$), что влияет на термический КПД цикла [1].

В качестве основного топлива для энергоустановки был принят природный газ. Природный газ является экологически чистым топливом. Также, достоинством данного вида топлива является то, что его не требуется предварительно подготавливать перед сжиганием. Недостатками использования природного газа в качестве топлива являются:

сложность подведения и хранения газа, его взрывоопасность. К тому же не везде имеется возможность для его подключения. В расчетах низшая теплотворная способность природного газа принималась равной 50 МДж/кг.

В качестве резервного топлива для разрабатываемой установки эффективно применение пеллетов. Также пеллеты будут эффективны в качестве альтернативного топлива там, где нет возможности подвести газ. Достоинствами пеллет является их относительная безопасность по сравнению с природным газом, экологичность, удобство хранения, малая зольность, низкое содержание серы по сравнению с другими видами твердого и жидкого топлива. К недостаткам можно отнести низкую удельную теплоту сгорания (17 МДж/кг), высокую удельную стоимость по сравнению с природным газом [2].

В результате произведенного термодинамического расчета энергоустановки на основе ОЦР с применением различного топлива (условное топлива, газ, пеллеты), была получена стоимость затрат топлива для выработки 1 кВт·ч тепловой и электрической энергии (таблица 1). Также было произведено сравнение стоимости выработки 1 кВт·ч тепловой и электрической энергии при помощи газотурбинной установкой Capstone C-30, дизельного генератора, а также сравнение со стоимостью при покупке по действующим тарифам у энергосбытовых компаний, действующих на территории РБ. Параметры энергоустановок Capstone C-30 и дизельного генератора Kipor KDE6500E приведены в [3, 4]. В связи с особенностью конструкции, стоимость затрат топлива на производство 1 кВт·ч тепловой и электрической энергии для Capstone C-30 и дизельного генератора были рассчитаны исходя из расхода топлива на номинальном режиме и стоимости соответствующего топлива, а затем поделены в пропорции относительно вырабатываемой тепловой и электрической энергии. При этом суммарная стоимость выработки 1 кВт·ч тепловой и электрической энергии у данных агрегатов не изменяется в зависимости от нужд в электрической или тепловой энергии конечного потребителя. Тарифы при централизованной покупке тепловой и электрической энергии были приняты в соответствии с нормативными документами [5].

Таблица 1

Сравнение стоимости затрат на выработку электрической и тепловой энергии

Показатель	ОЦР на усл. топливе	ОЦР на природном газе	ОЦР на пеллетах	Централизованная выработка (ТЭЦ)	Capstone C-30	Дизельный генератор (Kipor KDE6500E)
Термический КПД, %	25			35	26	43
Тепловая энергия, руб./кВт·ч	0,655	0,400	1,412	1,701	1,379	3,250
Электрическая энергия, руб./кВт·ч	2,571	1,569	5,538	2,010	0,621	9,750
Суммарная стоимость, руб./кВт·ч	3,172	1,969	6,950	3,711	2,000	13,000

Разрабатываемая энергоустановка с природным газом в качестве основного топлива производит более дешёвую тепловую и электрическую энергию, чем при централизованной покупке, в которую включены потери при доставке. На резервном топливе (пеллеты) установка более выгодна при производстве тепловой энергии (по сравнению с централизованной выработкой), но проигрывает в себестоимости выработки электрической энергии. При доработке установки системой регенеративного отбора её КПД повысится приблизительно на 5%, но при этом усложнится её конструкция [1].

Тепловая мощность, требуемая потребителю, зависит от его географического расположения и времени года. Для самого холодного времени (декабрь–январь) в данном исследовании принималось, что при площади помещения 150 м² тепловой мощности на

отопление требуется 8 кВт, а на ГВС (горячее водоснабжение) – 0,7 кВт. Данные были приняты из расчёта, что тепловая мощность будет вырабатываться 24 часа в сутки 30 дней в месяц. В тёплый период года (май–сентябрь) тепловая мощность требуется только на ГВС (рисунок 3). Для дома площадью 150 м² было принято, что в месяц затраты электроэнергии составят 500 кВт·ч в месяц.

Рисунок 3. График потребной тепловой нагрузки в течение года

На рисунке 4 представлены годовые затраты на выработку тепловой и электрической энергии, с учетом потребной тепловой и электрической нагрузки в течение года. Дизельные генераторы имеют наибольшую стоимость затрат топлива даже при использовании теплоты уходящих газов. Это связано с высокой удельной стоимостью дизельного топлива.

Рисунок 4. Месячные затраты сравниваемых вариантов энергообеспечения

Применение газа в установке на основе ОЦР имеет наибольшую выгоду при использовании в отопительный период. В летний период, когда большая часть затрат топлива уходит на производство электроэнергии, высокую стоимость эксплуатации имеют дизельный генератор и энергомодуль с применением пеллет в качестве топлива.

Использование пеллет в качестве основного топлива в разрабатываемой установке в плане расхода топлива при прочих равных параметрах является более дорогостоящим по сравнению с условным топливом и природным газом. Далее по стоимости выработки следует централизованная выработка тепловой и электрической энергии, в зимний период

времени затраты приближаются к затратам при использовании пеллет в качестве топлива. Также были рассчитаны годовые затраты для каждого из методов производства тепла и электроэнергии за год и суммарная годовая стоимость (таблица 2).

Таблица 2

Суммарные затраты на производство тепловой и электрической энергии

Показатель	ОЦР на усл. топливе	ОЦР на природном газе	ОЦР на пеллетах	Централизованная выработка (ТЭЦ)	Capstone C-30	Дизельный генератор (Kipor KDE6500E)
1	2	3	4	5	6	7
Затраты на отопление, руб.	18451,4	11268,0	39776,0	47917,2	13663,2	243242,7
Затраты на ГВС, руб.	3961,4	2419,2	8539,8	10287,6	1918,9	39908,3
Затраты на электроэнергию, руб.	15426,0	9414,0	33228,0	12060,0	10096,3	38408,4
Суммарные годовые затраты, руб.	37838,8	23101,2	81543,8	70264,8	25678,4	321559,4

Для энергоустановки наиболее выгодным вариантом является использование газа в качестве топлива. В зимний период она имеет наиболее низкую стоимость выработки тепловой и электрической (3290,1 руб./месяц), в летний период так же является самым выгодным (986,1 руб./месяц). Это связано с низкой стоимостью топлива и высокой теплотой сгорания. Из всех рассмотренных вариантов выработка тепловой энергии на ГВС в течение года с помощью Capstone C-30 наиболее выгодна, так как стоимость на выработку тепловой энергии уменьшается при снижении потребления тепловой энергии, но при этом повышается стоимость электроэнергии.

Рассматриваемая установка на основе ОЦР на условном топливе при сравнении с централизованной выработкой при выработке тепловой энергии оказалась экономичнее на 60,1%. Покупка электроэнергии по тарифам [5] для физических лиц выгоднее на 2,8%, чем ОЦР с применением условного топлива.

Вывод

Децентрализованная когенерация тепловой и электрической энергии может создать резервное энергоснабжение, обеспечить удаленных потребителей тепло- и электроэнергией, исключить потери при доставке энергии. Экономичность когенерации зависит от вида и стоимости используемого топлива.

Использование природного газа в качестве топлива экономически оправдано по затратам топлива (23 101,2 руб./год). Самой экономически неэффективной установкой по затрате топлива, при прочих равных параметрах, является дизельный генератор (321 559,4 руб./год).

Для резервного снабжения целесообразным будет использование пеллет в качестве топлива. Они более просты в хранении и использовании, чем природный газ, хотя и имеют высокие годовые затраты (81 543,8 руб./год).

Применение ОЦР на условном топливе показывает среднюю экономическую эффективность (37838,8 руб./год).

1. Кириллин А. В. Техническая термодинамика [Электронный ресурс]: учебник для вузов / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 495 с.
2. Кишалов А. Е., Зародов Е. А. Анализ бытовых отопительных котлов для объектов малой энергетики // Молодежный Вестник УГАТУ. 2016, № 2 (15). С. 22–26.
3. C30: Capstone Turbine Corporation (CPST) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.capstoneturbine.com/products/c30>
4. Дизельный генератор KIPORKDE 6500 E [Электронный ресурс]. URL: <http://kipor.nt-rt.ru/images/showcase/catalog.pdf>
5. Тарифы на электрическую энергию по Республике Башкортостан на 2018 год для физических лиц [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bashesk.ru/tariffs/current/>