

УДК 621.175

И.С. Самоявчев

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЕКТА ПРИМЕНЕНИЯ ОЦР-УСТАНОВОК В ОКРАСОЧНЫХ ЦЕХАХ АВТОМОБИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА ГОРЬКОВСКОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ЗАВОДА

Автомобильный завод «ГАЗ»

Вторичное использование тепла для получения электрической и тепловой энергии на промышленных объектах является актуальным направлением экономии энергетических ресурсов. Статья посвящена вопросам повышения энергетической эффективности автомобильных производств за счет рекуперации электрической и тепловой энергии с помощью установок на основе органического цикла Ренкина (ОЦР). Приведено описание принципа действия ОЦР-установок и технологии их использования для рекуперации электрической и тепловой энергии. Показано, что в электроэнергию может быть преобразовано до 20% переданной ОЦР-установке тепловой энергии. Проведен анализ параметров, от которых зависит КПД ОЦР-установки по выработке электроэнергии. Выделено оборудование, которое может использоваться в качестве потребителей рекуперированной энергии. На примере двух окрасочных цехов автомобильного производства выполнена оценка экономических показателей проектов внедрения ОЦР-установки. Для исследуемых цехов срок окупаемости проектов получился 10 и 16 лет. Рассмотрены аспекты повышения экономической эффективности применения ОЦР-установок.

Ключевые слова: автомобильное производство, окрасочный цех, органический цикл Ренкина, рекуперация энергии, ресурсосбережение, срок окупаемости, энергетическая эффективность.

1. Введение

Актуальным направлением повышения эффективности использования энергоресурсов на промышленных объектах (окрасочные цеха, сталелитейные производства, термическая обработка стали, цементные заводы и пр.) является вторичное использование низкопотенциальных тепловых выбросов.

Промышленные предприятия выбрасывают в окружающую среду большое количество тепловой энергии вместе с потоками продуктов сгорания и охлаждающей жидкости при относительно низкой температуре. Это крайне неблагоприятно воздействует на окружающую среду, загрязняя ее и приводя к изменениям климата. Кроме того, стоимость выброшенной

энергии в конечном счете закладывается в себестоимость продукции. Поэтому в последнее время прилагаются большие усилия по утилизации тепловых отходов предприятий промышленности, с возможностью генерации электроэнергии [1].

II. Цикл Ренкина

Для утилизации низкопотенциальной энергии все чаще применяется цикл Ренкина с альтернативными рабочими телами, в качестве которых обычно используются органические вещества (класс соединений, в состав которых входит углерод, за исключением карбидов, карбонатов, оксидов углерода и цианидов), с более низкой, чем у воды, температурой кипения. Благодаря этому появляется возможность реализации цикла Ренкина при более низкой температуре. Соответствующий цикл получил название органический цикл Ренкина (Organic Rankine Cycle – ОЦР). Принято считать, что источник энергии является низкопотенциальным, если его температура не превышает 500-570 К (230-300°C).

Рабочим телом в ОЦР является вещество, имеющее более низкую, чем у воды, температуру кипения. Благодаря этому испарение рабочего тела происходит при относительно низкой температуре, что и позволяет утилизировать низкопотенциальную энергию. На рис. 1 приведены две схемы, иллюстрирующие принцип работы ОЦР-установки. На рис. 1, а изображена схема ОЦР без регенератора, на рис. 1, б – схема ОЦР с регенератором.

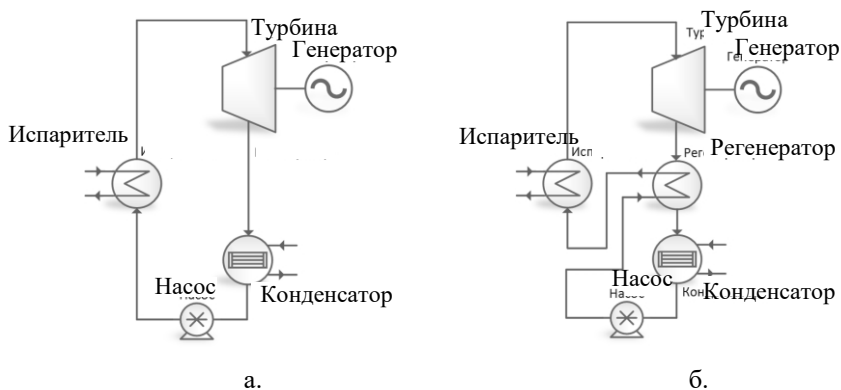


Рис.1. Схема ОЦР-установки:
(а) без регенератора; (б) с регенератором

Принцип работы установки следующий. В схеме на рис. 1(а) насос закачивает рабочее тело в жидком состоянии в теплообменник-испаритель,

где при высоком давлении оно испаряется. Далее пар попадает в турбину, в которой, расширяясь, он совершает работу. Вал турбины вращается и приводит в действие генератор. Отработанный пар охлаждается, и рабочее тело конденсируется. Далее, вещество в жидком состоянии попадает в насос и цикл замыкается. В схеме на рис. 1(б) рабочее тело на выходе из турбины попадает в регенератор, где отдает часть тепловой энергии сжатой жидкости, которая направляется в испаритель.

Тепловая энергия в ОЦР-установках может переноситься от источника теплоты к рабочему телу с использованием промежуточного теплоносителя, в качестве которого обычно применяется термальное масло. Использование промежуточного теплоносителя позволяет избежать локального перегрева рабочего тела.

При наличии больших потоков энергии в ОЦР эффективнее использование турбины, если потоки энергии невелики, предпочтительнее использовать поршневой детандер. Кроме того, поршневые детандеры более приспособлены для работы в условиях флуктуаций тепловых потоков от внешнего источника теплоты.

На рис. 2 представлен общий вид ОЦР-установки. На рис. 3 показана схема потоков энергии от источника бросового тепла к ОЦР-установке и к потребителям.

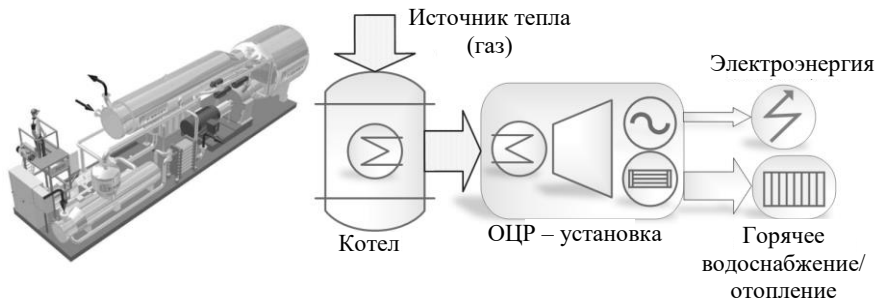


Рис.2. Рекуперация тепловой энергии с помощью ОЦР-установки

Из приведенной диаграммы следует, что 20% тепловой энергии, переданной ОЦР-установке, может быть преобразовано в электроэнергию, а 80% энергии остается в виде тепла и может быть использовано для отопления или горячего водоснабжения. Таким образом, целесообразность применения ОЦР-установок значительно выше там, где существует стабильное потребление тепловой энергии.

Суммарная электрическая мощность всех электростанций на территории РФ составляла 225 ГВт, а суммарная тепловая мощность – 270,8 тыс. Гкал/ч (315 ГВт). Отношение суммарной установленной тепловой мощности к суммарной электрической составляет 1,4.

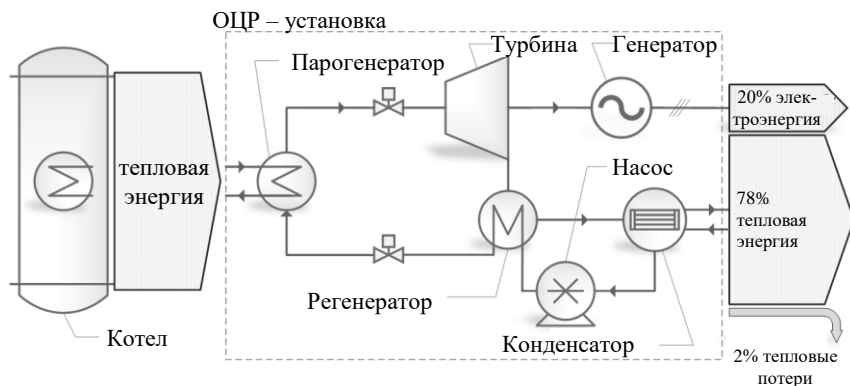


Рис.3. Энергетическая диаграмма ОЦР-установки

III. Расчетные параметры

Агентство энергетической информации США (EIA) выделило энергосистему Российской Федерации как наиболее перспективную для развития когенерации. Ее доля в производстве электроэнергии в РФ к 2030 году может вырасти до 43 %. Наличие большой тепловой нагрузки на территории РФ определяет столь высокий потенциал развития малой энергетики на базе когенерационных установок [4].

В действительности КПД ОЦР-установки по выработке электроэнергии зависит от множества параметров. В табл. 1 приведена зависимость КПД ОЦР-установок от температуры бросового тепла и охладителя [5].

Для определения количества электроэнергии, которое может быть рекуперировано ОЦР-установкой, рассчитывается количество утилизируемого тепла [2]:

$$Q_{\text{в}}^{\text{т}} = L \cdot \rho_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{in}} - t_{\text{out}}), \quad (1)$$

где L – расход воздуха; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха; $c_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воздуха; t_{in} – температура на входе ОЦР – установки; t_{out} – температура на выходе ОЦР-установки.

Таблица 1.
КПД ОЦР-установок

Температура бросового тепла, °С	Температура бросового тепла, °F	Температура охладителя, °С	Температура охладителя, °F	КПД Цикла Карно ОЦР-установки, %	КПД ОЦР-установки, %
<38	<100	49	120	-	-
38-93	100-200			12,0	4,0
93-149	200-300			24,4	8,1
149-204	300-400			33,7	11,2
204-260	400-500			41,0	13,7
260-316	500-600			46,8	15,6
316-371	600-700			51,6	17,2
371-427	700-800			55,6	18,5
427-482	800-900			59,0	19,7
482-538	900-1000			61,9	20,6
538-593	1000-1100			64,5	21,5

Таблица 2.
Расчет количества утилизируемого тепла

№ п.п.	Параметр	Цех окраски	
		№1	№2
1	Температура воздуха на выходе из трубы (t_{in}), °С	175	205
2	Температура воздуха на выходе ОЦР-установки (t_{out}), °С	20	20
3	Объем выбрасываемого воздуха (L), м ³ /ч	47043	31320
4	Удельная теплоемкость воздуха (c_v), Вт/(кг·град)	0,279	0,279
5	Плотность воздуха (ρ_v), кг/м ³	0,79	0,79
6	Количество утилизируемой тепловой энергии Q^v , МВт	1,6	1,3
7	Электрический КПД, %	11,2	11,2
8	Электрическая мощность ОЦР-установки, МВт	0,18	0,15

На основании данных из табл. 1, 2 может быть определено количество электрической и тепловой энергии, рекуперированной ОЦР-установкой, а также произведен расчет суммарной годовой экономии от утилизации бросового тепла (табл. 3).

Учитывая нестабильность и относительно малую мощность потока бросового тепла, потребители рекуперированной энергии могут использовать оборудование, не задействованное в технологическом процессе: освещение или горячее водоснабжение.

Таблица 3.
КПД ОЦР-установок

№ п.п.	Параметр	Цех окраски	
		№ 1	№ 2
1	Наработка установки, ч/год	4000	4000
2	Электрическая мощность установки, МВт	0,18	0,15
3	Потребляемая электрическая мощность на освещение, МВт	1,15	0,57
4	Тепловая мощность установки, МВт	1,28	1,02
5	Выработка электроэнергии, МВт·ч/год	718	571
6	Стоимость электроэнергии, руб/МВт·ч	4500	4500
7	Экономия от выработанной электроэнергии, млн. руб/год	3,23	2,57
8	Выработка тепловой энергии для ГВС, МВт·ч/год	5132	4078
9	Потребление тепловой энергии на ГВС, МВт·ч/год	1858	300
10	Стоимость тепловой энергии для ГВС, руб/МВт·ч	976	976
11	Экономия от выработанной тепловой энергии, млн руб/год	1,8	0,3
12	Суммарная экономия, млн. руб	5,03	2,87

Как видно из табл. 3, потребление тепловой энергии на горячее водоснабжение в исследуемых цехах значительно меньше вырабатываемого ОЦР-установкой тепла. При этом потребляемая в цехах мощность на освещение в несколько раз превышает мощность ОЦР-установки. Таким образом, реальная экономия от использования ОЦР-установки будет зависеть от инфраструктурных особенностей промышленного объекта, технической возможности и количественных показателей потребления электро- и тепловой энергии. На основании полученных данных по годовой экономии от вырабатываемой электро- и тепловой энергии, может быть определен период окупаемости ОЦР-установки. Оценка удельных капитальных затрат на киловатт электрической мощности (ОЦР-установка, монтажные работы, теплообменник) в зависимости от электрической мощности ОЦР-установки приведен в табл. 4 [3].

Таблица 4.
Удельные капитальные затраты

	Электрическая мощность ОЦР-установки				
	50-500 кВт	500-1000 кВт	1-5 МВт	5-20 МВт	>20 МВт
Удельные капитальные затраты*, руб./кВт	301500	268000	201000	167500	140700

* Примечание: исходные данные [5] приведены в долларовом выражении, при переводе курс доллара принят 67 руб.

Таблица 5.
Период окупаемости ОЦР-установки

	Параметр	Цех окраски	
		№ 1	№ 2
1	Экономия от выработанной эл.энергии, млн руб./год	3,23	2,57
2	Экономия от выработанной тепловой энергии, млн. руб./год	1,8	0,3
3	Стоимость технического обслуживания*, млн. руб./год	0,45	0,45
4	Суммарная экономия, млн. руб.	4,6	2,4
5	Расчетная (электрическая) мощность ОЦР-установки, кВт	180	150
6	Удельные капитальные затраты, руб./кВт	261000	261000
7	Капитальные затраты, млн. руб.	46,98	39,15
8	Период окупаемости, лет	10	16

* Примечание: средняя стоимость обслуживания ОЦР-установок на типовых промышленных объектах [3].

IV. Заключение

Согласно произведенным расчетам (табл. 5), период окупаемости для исследуемых цехов № 1 и № 2 составил 10 и 16 лет соответственно. Как было показано выше, удельные капитальные затраты зависят от мощности ОЦР-установки и тем выше, чем меньше объем бросового тепла. Кроме того, важным фактором при оценке целесообразности использования являются инфраструктурные особенности промышленного объекта, которые будут определять техническую возможность и объем потребления электрической и тепловой энергии.

© Самоявчев И.С., 2018

Библиографический список

- [1] Белов Г.В., Дорохова М. А. Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 2. С. 99-124.
- [2] Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Солнышкова Ю.С., Пророкова М.В. Тепловой расчет рекуперативного теплообменного аппарата. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2013. – 124 с.
- [3] Vescovo R. ORC recovering industrial heat. Turboden. Cogeneration and On-Site Power Production, 2009.
- [4] Михеев Д.В., Шабалин И.С. Экономические перспективы развития малой энергетики РФ на основе когенерационного оборудования // Актуальные вопросы современной науки. 2014. № 31. С. 237-249.

- [5] Elson A., Tidball R., Hampson A. Waste heat to power market assessment. ICF International, March 2015. – 86 p.

I.S. Samoyavchev

**ESTIMATION OF ECONOMIC INDICATORS
OF THE PROJECT OF APPLICATION
OF CRO-INSTALLATIONS IN THE PAINT PLANTS
OF GORKY AUTOMOBILE PLANT**

GAZ international LCC,
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Recycling of heat to generate electricity and heat at industrial facilities is an important direction of saving energy resources. The article is devoted to the issues of increasing the energy efficiency of automotive production through the recovery of electrical and thermal energy using installations based on the organic Rankine cycle (ORC). The description of the principle of operation of the ORC facility and the technology of their use for the recovery of electrical and thermal energy is given. It is shown that up to 20% of the thermal energy transferred to the ORC facility can be converted into electricity. The analysis of the parameters that determine the efficiency of the ORC facility for the generation of electricity. Allocated equipment that can be used as consumers of recovered energy. An assessment of the economic performance of projects for the introduction of a ORC facility was carried out on the example of two paint shops of automobile production. The project payback period was 10 and 16 years for paint shops studied. The aspects of improving the ORC facility economic efficiency were considered.

Keywords: automobile production, energy efficiency, energy recovery, organic Rankine cycle, paint shop, payback period, resource saving.

References

- [1] G.V. Belov and M.A. Dorokhova. Organic Rankine cycle and its use in alternative energy // Science and Education of Bauman MSTU, vol. 2, pp. 99-124, 2014.
- [2] V.V. Bukhmirov, D.V. Rakutina, Yu.S. Solnyshkova and M.V. Prorokova, Thermal calculation of recuperative heat exchanger. Ivanovo: Ivanovo State Energy University n.a. V.I. Lenin, 2013.
- [3] R. Vescovo, ORC recovering industrial heat. Turboden. Cogeneration and On-Site Power Production, 2009.
- [4] D.V. Mikheev and I.S. Shabalin. Economic prospects for the development of small energy of the Russian Federation on the basis of cogeneration equipment // Actual issues of modern science, vol. 31, pp. 237-249, 2014.
- [5] A. Elson, R. Tidball and A. Hampson, Waste heat to power market assessment. ICF International, March 2015.