_____ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ____ ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

ЭКСЕРГОЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА НА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

© 2021 г. S. Upadhyaya^{*a*, *}, V. Gumtapure^{*a*}

^aDepartment of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Karnataka, Surathkal, Mangalore, India-575025, India *e-mail: suhas.upa@gmail.com Поступила в редакцию 06.03.2020 г. После доработки 26.07.2020 г. Принята к публикации 23.09.2020 г.

Одной из наиболее перспективных технологий в области распределенной энергетики является использование установок, работающих по так называемому органическому циклу Ренкина (ОЦР). ОЦР-технология применяется для утилизации низкопотенциальной тепловой энергии природного или техногенного происхождения. При этом в каждом конкретном случае использования ОЦР-систем актуально проведение технико-экономической оптимизации проекта. В данной работе предлагается производить оценку стоимости производства электроэнергии ОЦР-установкой с помощью эксергоэкономической модели. Для оптимизации параметров системы в целях минимизации тарифа на электроэнергию используется метод генетического алгоритма. В работе представлены результаты оптимизации параметров ОЦР-системы, которая включает в себя солнечный коллектор и ОЦР-установку. В качестве рабочего тела в установке используется хладагент R245fa. С помощью математической модели рассчитывается тариф на электроэнергию путем суммирования затрат для каждого из компонентов ОЦР-системы. Для заданного рабочего диапазона параметров ОЦР-установки электрической мощностью 1.03 кВт определен минимальный тариф на электроэнергию в размере 0.056 дол/(кВт · ч). Определены также оптимальные параметры рабочего тела в ОЦР-установке, при которых полученная электроэнергия может иметь минимальную стоимость.

Ключевые слова: органический цикл Ренкина, рабочее тело, теплоноситель, генетический алгоритм, эксергоэкономический анализ, оптимизация, тариф на электроэнергию, стоимость энергии **DOI:** 10.1134/S0040363621120109

В последние годы мировое потребление энергии росло бурными темпами. Источники производства и потребления энергии оказывают значительное влияние на общество и окружающую среду. По данным Международного энергетического агентства, при существующей тенденции потребления энергии к 2050 г. мировой спрос на нее увеличится на 70%, выбросы вредных веществ повысятся на 60% по сравнению с 2011 г., что приведет к серьезным негативным последствиям для окружающей среды [1]. Эти выбросы могут повысить к 2050 г. среднюю температуру на планете на 6°С. Опасения по поводу изменения климата и глобального потепления побудили страны внедрять природосберегающие технологии с использованием солнечной, ветровой, геотермальной энергии и энергии, полученной из биомассы [2].

В последние несколько лет акцент сместился в сторону распределенных систем генерации, поскольку становится все труднее решать проблемы передачи и сбыта энергии [3]. Одной из технологий, привлекших внимание исследователей, является органический цикл Ренкина. Концепция ОЦР аналогична паровому циклу Ренкина, и такая установка включает в себя те же компоненты, что и обычная паротурбинная электростанция (котел, расширительное устройство, конденсатор и насос). Однако рабочее тело представляет собой органическое соединение, которое имеет более низкие температуры кипения по сравнению с водой. Установка, работающая по ОЦР-технологии, вырабатывает электроэнергию, утилизируя тепло низкотемпературного источника.

На долю низкопотенциальной тепловой энергии (НТЭ) приходится более 50% общего объема тепла, вырабатываемого в промышленности. Этого достаточно, чтобы удовлетворить мировой спрос на энергию до 2035 г. [4]. Для демонстрации применимости ОЦР-технологии для рекуперации отработанного тепла в промышленности были проведены обширные исследования [5–8]. Однако НТЭ также может быть получена из природных источников с помощью солнечных тепловых коллекторов или посредством использования геотермальной энергии [9].

За последние годы было проведено много исследований ОЦР-установок малой мощности (1– 10 кВт) с солнечными тепловыми коллекторами. Авторы работы [10] разработали и построили в Лесото ОЦР-систему электрической мощностью 3 кВт с солнечным коллектором. ОЦР-система включала в себя солнечные коллекторы с параболоцилиндрическими концентраторами для получения необходимого для подвода к ОЦР-установке тепла, тепловой аккумулятор для выравнивания колебаний инсоляции и непосредственно ОЦР-установку. В качестве турбины ОЦР-установки использовался спиральный (винтовой) расширитель. Максимальный общий электрический КПД установки составил 8%.

В работе [11] исследована и проанализирована производительность низкотемпературной ОЦРустановки на солнечной энергии, в которой в качестве рабочего тела используется R245fa. Применялись плоские пластинчатые и вакуумированные трубчатые солнечные коллекторы, а турбина представляла собой расширитель с подвижным поршнем. Общий КПД ОЦР-установки составил 4.2 и 3.2% с вакуумированными трубчатыми и плоскими пластинчатыми коллекторами соответственно.

Авторы [12] создали динамическую имитационную модель солнечной электростанции электрической мощностью 6 кВт с использованием программного обеспечения для моделирования TRNSYS, которое позволяет оценить производительность системы в различных климатических условиях. В процессе исследования было установлено, что КПД установки в течение всего года остается практически постоянным и составляет примерно 10%.

В работе [13] представлены результаты анализа работы ОЦР-системы с солнечными коллекторами с параболоцилиндрическими концентраторами, предназначенной для выработки электроэнергии и тепла (когенерации) для промышленных нужд. В частности, был рассмотрен пример когенерации для текстильного производства. Авторы пришли к выводу, что такая ОЦР-система является перспективным вариантом получения электроэнергии и тепла применительно к технологическим процессам, происходящим при невысокой температуре.

Некоторые исследователи разработали термодинамические модели низкотемпературных ОЦРсистем для изучения влияния различных рабочих тел на КПД, а также для проведения параметрической оптимизации и разработки наиболее подходящей для заданных параметров конструкции ОЦРустановки [14–16]. Авторы [17] провели экспериментальное исследование и оценили эффективность ОЦР-системы мощностью 50 кВт (эл.) с использованием НТЭ. Результаты исследования показали, что давление испарения и давление конденсации рабочего тела являются ключевыми параметрами, влияющими на эксергию¹ потоков и эксергетический КПД ОЦР-установки. В работе [18] представлены результаты термодинамического анализа применимости и эффективности 15 различных органических жидкостей в качестве рабочих тел когенерационной ОЦР-установки с солнечными коллекторами.

В отличие от многих традиционных методов оптимизации, метод генетического алгоритма (ГА) имеет более широкую область поиска, и при запуске поиска в "популяции" возможных решений задействовано несколько критериев, что позволяет эффективно исключать выбор неоптимальных решений. С помощью метода ГА авторы [19] оптимизировали регенеративный ОЦР для рекуперации отработанной НТЭ, использовав эксергетический КПД в качестве целевой функции. В работе [20] представлены результаты анализа эффективности регенеративного ОЦР, работающего на тепловой энергии от плоских пластинчатых солнечных коллекторов и использующего в качестве рабочих тел R245fa, R123, изобутан и R134a. Повышение давления и температуры рабочего тела на входе в турбину или снижение его конечного давления (на выходе из турбины) оказали положительное влияние на КПД установки.

В работе [21] представлены результаты термоэкономической оценки и многоцелевой оптимизации эффективности процесса тригенерации (получения холода, тепла и электроэнергии) для бытового применения микроТЭЦ на основе ОЦР на солнечной энергии. Система была проанализирована и оптимизирована методами термодинамического и экономического анализа. Результаты показали, что для летнего периода эксергетический КПД, термический КПД и стоимость продукции составили 23.66%, 9.51% и 5114.5 дол/год, а для зимнего – 48.45%, 13.76% и 5688.1 дол/год соответственно.

Авторы [22] провели эксергоэкономическую оптимизацию регенеративного ОЦР с использованием НТЭ. В качестве целевых функций были выбраны энергоэффективность и себестоимость электроэнергии, а в качестве независимых переменных – степень перегрева рабочего тела и соотношение давлений. Были рассмотрены девять рабочих тел, среди которых R134a обеспечил максимальные энергетический и эксергетический КПД ОЦР. Тариф на электроэнергию для установки

¹ Эксергия — мера максимальной способности системы выполнять полезную работу при переходе ее от собственных параметров к заданному конечному состоянию в равновесии с окружающей средой. Это конечное состояние называется "мертвым состоянием".

варьировался от 0.08 до 0.12 дол/(кВт · ч) в зависимости от затрат на топливо.

Из приведенного обзора литературы можно сделать вывод, что данные о результатах эксергоэкономического анализа эффективности автономных ОЦР-систем малой мощности ограничены. В настоящем исследовании проведена эксергоэкономическая оптимизация ОЦР-системы на солнечной энергии электрической мощностью 1 кВт для определения минимальной стоимости производства электроэнергии. При этом для выполнения оптимизации с помощью программы решения инженерных уравнений используется метод ГА.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ЕЕ ЭКСЕРГОЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Схема рассматриваемой ОЦР-системы представлена на рис. 1. Она включает в себя насос для сжатия рабочего тела до требуемого давления, после которого оно направляется в испаритель, куда подводится тепло. Пар под давлением поступает в турбину (расширитель), где совершается механическая работа, после чего давление рабочего тела падает. Наконец, рабочее тело конденсируется в конденсаторе и ОЦР-цикл завершается. Подвод тепла к испарителю ОЦР-установки осуществляется от солнечного коллектора посредством теплоносителя (воды), отвод тепла – путем подачи в конденсатор охлаждающей воды от градирни.

При выполнении эксергоэкономического анализа рассматриваются относительные стоимости потоков эксергии компонентов в общем балансе ОЦР-системы. После того как определены затраты, связанные с потоками эксергии, учитываются капитальные и эксплуатационные затраты для проведения полного анализа затрат.

Стоимость эксергии для потоков в любом балансе затрат определяется как

$$C = cE, \tag{1}$$

где c — относительная стоимость потока эксергии, дол/(кВт · ч); E — эксергия потока, кВт.

Типовой баланс затрат для каждого компонента ОЦР-системы

$$\sum C_{in} + Wc_{e,in} + Z = \sum C_{out} + Wc_{e,out},$$
(2)

где C_{in} — стоимость входного потока эксергии для компонента, определяемая по (1), дол/ч; W — электрическая мощность, потребляемая или вырабатываемая компонентом системы, кВт; $c_{e,in}$ — тариф на потребляемую электроэнергию, дол/(кВт · ч); Z капитальные и эксплуатационные затраты на компонент, дол/ч; C_{out} — стоимость выходного потока эксергии для компонента, вычисляемая по (1), дол/ч; $c_{e,out}$ — тариф на вырабатываемую электроэнергию, дол/(кВт · ч).

Выход теплоносителя Вход теплоносителя 2 3 Испаритель Солнечный коллектор Hacoc Расширитель Генератор 4 Конденсатор Выхол охлаждающей воды Вход охлаждающей волы Градирня

Рис. 1. Принципиальная схема ОЦР-системы на солнечной энергии

Для рассматриваемой системы проводится анализ затрат для оценки первоначальных капитальных затрат (initial capital costs – ICC) и затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание (operating & maintenance – O&M). Для учета амортизации первоначальных капитальных затрат и затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание в течение n = 20 лет по процентной ставке i = 5% используется коэффициент A_f [23]:

$$A_f = \frac{i(i+1)^n}{(1+i)^{n-1}}.$$

Общие затраты для каждого из компонентов системы необходимо рассчитывать в долларах в час, чтобы использовать их в уравнениях баланса затрат. Первоначальные капитальные вложения, а также затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание складываются с учетом амортизации. Предполагается, что затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание компонента определяются как процент от первоначальных капитальных вложений. Общие капитальные затраты (total capital costs – TCC_x) на компонент² можно рассчитать следующим образом:

$$\Gamma CC_x = A_f \left[ICC_x + (O\&M)_x \right],$$

где $(O\&M)_x = ICC_x \times OM_x$; $OM_x - доля$ (в процентах) первоначальных капитальных вложений, определяющая затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание компонента [23].

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 12 2021

² Здесь и далее индекс "*x*" обозначает тот или иной компонент ОЦР-системы.

Для солнечных панелей с коллекторами значение OM_x может быть принято равным 15%, для остальных компонентов ОЦР-системы – 25%.

Первоначальные капитальные вложения ІСС, дол., определенные в [24], составляют:

Солнечные панели с коллекторами	17050
Испаритель	450
Спиральный (винтовой) расширитель	
с генератором	5950
Конденсатор	1650
Насос	750

Для расчета капитальных и эксплуатационных затрат на компонент Z_x общие капитальные вложения необходимо разделить на количество часов в году:

$$Z_x = \frac{\text{TCC}_x}{8760}$$

Как уже отмечалось ранее, для проведения эксергоэкономического анализа составляются балансы затрат по каждому из компонентов ОЦРсистемы. Стоимость испарителя добавляется к общей капитальной и эксплуатационной стоимости солнечного коллектора, а стоимость насоса и конденсатора - к стоимости расширителя, поскольку поток эксергии в этих компонентах незначителен. Предполагается, что относительные затраты на эксергию потока, выходящего из расширителя, составляют 50% затрат на эксергию потока, поступающего в расширитель, поскольку этот поток имеет более низкую температуру. Относительные затраты на эксергию потоков на входе в конденсатор и насос и на выходе из них равны нулю, так как эти потоки обладают низким эксергетическим потенциалом. Балансы затрат по основным компонентам ОЦР-системы приведены далее, а индексы 1, 2, 3 и 4 характеризуют различные точки термодинамического состояния рабочего тела в установке (см. рис. 1).

Баланс затрат для солнечного плоского пластинчатого коллектора (обозначен индексом "*col*") и испарителя (обозначен индексом "*ev*")

$$E_{in}c_f + E_2c_2 + Z_{col} + Z_{ev} = E_3c_3.$$

При этом необходимо учитывать, что относительная стоимость входного потока эксергии (затраченной эксергии топлива) c_f для солнечного плоского пластинчатого коллектора считается нулевой, следовательно, $E_{in}c_f = 0$.

Баланс затрат для расширителя (с учетом конденсатора и насоса):

$$E_3c_3 + Z_{exp} + Z_{pump} + Z_{cond} = Wc_{e,out} + E_4c_4,$$

где $c_{e,out}$ — тариф на вырабатываемую ОЦР-установкой электроэнергию, дол/(кВт · ч); $c_4 = 0.5 c_3$; индексы "*exp*", "*pump*" и "*cond*" соответствуют расширителю, насосу и конденсатору соответственно.

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛИ

Анализ чувствительности эксергоэкономической модели позволяет определить, как изменение одного параметра при сохранении неизменными всех остальных влияет на целевую функцию. В данном исследовании оценивалось влияние давления рабочего тела в испарителе на стоимость электроэнергии. Входными параметрами для моделирования являлись следующие:

Удельная теплоемкость
жидкого теплоносителя, кДж/(кг · К)4.19
Внутренний относительный КПД, %:
расширителя7.0
насоса70
Массовый расход
теплоносителя, кг/с0.3
Температура
в "мертвом состоянии", °С25
Давление
в "мертвом состоянии", МПа0.1

Влияние давления рабочего тела в испарителе

Для рабочего тела ORC-системы R245fa давление испарения варьировалось в диапазоне от 0.6 до 1.0 МПа. Степень перегрева рабочего тела и температура теплоносителя (горячей воды) на входе в испаритель принимались равными 5 и 100°С соответственно. При этом под степенью перегрева понималась разница между температурой рабочего тела на входе в расширитель и температурой насыщения в испарителе. Минимальный температурный напор в аппарате составлял 5°С и определялся как разность температур на выходе теплоносителя (горячей воды) из зоны испарения и температурой насыщения рабочего тела, соответствующей давлению в испарителе.

Результаты расчетов (рис. 2) свидетельствуют об уменьшении стоимости электроэнергии с увеличением давления в испарителе.

Влияние давления рабочего тела в конденсаторе

Как и в предыдущем расчете, степень перегрева и температура теплоносителя на входе в испаритель принимались равными 5 и 100°С соответственно. Давление в испарителе — 0.8 МПа. Из рис. 3 видно, что стоимость электроэнергии увеличивается с повышением давления конденса-



Рис. 2. Влияние давления рабочего тела в испарителе на стоимость электроэнергии



Рис. 3. Влияние давления рабочего тела в конденсаторе на стоимость электроэнергии

ции, так как потери эксергии возрастают при повышении давления конденсации с 0.2 до 0.3 МПа. Кроме того, потери эксергии также увеличиваются из-за уменьшения выдаваемой электрической мощности расширителя, что обусловлено снижением в нем теплоперепада.

ЭКСЕРГОЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Метод ГА используется для оптимизации системы в целях минимизации затрат на производство электроэнергии. На первом этапе создается начальная популяции возможных решений (их также называют особями), что предотвращает сходимость алгоритма к неоптимальным решениям. Далее алгоритм ищет оптимальные решения, следуя дарвиновскому принципу "выживания наиболее приспособленных". При этом критерием для отбора определенных "генотипов" является "функция приспособленности". Начальная популяция генерируется случайным образом. Однако новая популяция формируется из начальной путем применения операторов "скрещивания" и "мутации" к выбранным с уче-

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 12 2021



Рис. 4. Блок-схема генетического алгоритма

том значения "приспособленности" особям (родителям). Этот метод отличается от обычных методов оптимизации, поскольку поиск оптимального осуществляется из группы решений. Процедура выполнения алгоритма представлена в виде блоксхемы на рис. 4.

Цель эксергоэкономического анализа — расчет тарифа на электроэнергию. В качестве независимых переменных выбираются давление рабочего тела в испарителе, давление рабочего тела в конденсаторе, температура теплоносителя на входе в испаритель и степень перегрева. Границы для независимых переменных устанавливаются исходя из предела работы расширителя и атмосферных ограничений. Верхняя и нижняя границы для независимых переменных, участвующих в оптимизации, а также некоторые параметры ГА приведены далее:

Размер начальной популяции64
Число решений для остановки
алгоритма128
Вероятность мутации0.18
Давление рабочего тела (R245fa)
в испарителе, МПа0.5-1.4
Степень перегрева, °С0–20
Температура теплоносителя
(горячей воды) на входе
в испаритель, °С80–120
Давление конденсации
рабочего тела (R245fa), МПа0.2-0.4
Полезная мощность, кВт1.0-1.5

В результате процесса оптимизации с помощью ГА определен оптимальный (минимальный) тариф на электроэнергию 0.056 дол/(кВт · ч) для ОЦР-системы полезной мощностью 1.03 кВт. Минимальная стоимость электроэнергии получена при следующих параметрах:

Степень перегрева, °С	.19.45
Давление рабочего тела, МПа:	
в испарителе	1.398
в конденсаторе	.0.224
Температура теплоносителя	
(горячей воды)	
на входе в испаритель, °С	114

Эксергетический КПД рассматриваемой ОЦРсистемы составляет 49.36%, а термический КПД – 11.35%.

выводы

1. Предложенная в работе эксергоэкономическая модель с использованием метода генетического алгоритма применима для определения оптимальных параметров работы ОЦР-систем, обеспечивающих максимальную эффективность ОЦР-установок и минимальную стоимость вырабатываемой на них электрической энергии.

2. Анализ чувствительности эксергоэкономической модели показал, что стоимость электроэнергии возрастает с увеличением давления рабочего тела в конденсаторе и уменьшается с увеличением давления рабочего тела в испарителе, что согласуется с традиционными положениями термодинамики.

3. Для ОЦР-системы электрической мощностью 1.03 кВт на солнечной энергии определена минимальная стоимость электроэнергии, которая составляет 0.056 дол/(кВт · ч). 4. Стоимость электроэнергии снижается с увеличением давления рабочего тела в испарителе и степени перегрева. Минимальная стоимость электроэнергии 0.056 дол/(кВт · ч) была получена при максимальном давлении рабочего тела в испарителе 1.398 МПа и степени перегрева 19.45°С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. International Energy Agency. 2014. I. Energy Technology Perspectives ETP2014, Harnessing electricity's potential. https://iea.blob.core.windows.net/assets/ f97efce0-cb12-4caa-ab19-2328eb37a185/EnergyTechnologyPerspectives2014.pdf
- Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems / S. Quoilin, M. Van Den Broek, S. Declaye, P. Dewallef, V. Lemort // Renewable Sustainable Energy Rev. 2013. V. 22. P. 168–186. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028
- 3. Delgado-Torres A.M., García-Rodríguez L. Analysis and optimization of the low temperature solar Organic Rankine Cycle (ORC) // Energy Convers. Manage. 2010. V. 51. Is. 12. P. 2846–2856. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.022
- 4. Ziviani D., Beyene A., Venturini M. Advances and challenges in ORC systems modeling for low grade thermal energy recovery // Appl. Energy. 2014. V. 121. P. 79–95. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.074
- Kaska Ö. Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry // Energy Convers. Manage. 2014. V. 77. P. 108–117.

https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.026

 Tumen Ozdil N.F., Segmen M.R., Tantekin A. Thermodynamic analysis of an Organic Rankine Cycle (ORC) based on industrial data // Appl. Therm. Eng. 2015. V. 91. P. 43–52.

https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.079

- 7. **Operation** and performance of a low temperature organic Rankine cycle / Zh. Miao, J. Xu, X. Yang, J. Zou // Appl. Therm. Eng. 2015. V. 75. P. 1065–1075. https://doi.org/0.1016/j.applthermaleng.2014.10.065
- Minea V. Power generation with ORC machines using low-grade waste heat or renewable energy // Appl. Therm. Eng. 2014. V. 69. Is. 1–2. P. 143–154. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.054
- Design and simulation of a prototype of a small-scale solar CHP system based on evacuated flat-plate solar collectors and organic Rankine cycle / F. Calise, M.D. d'Accadia, M. Vicidomini, M. Scarpellino // Energy Convers. Manage. 2015. V. 90. P. 347–363. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.014
- Performance and design optimization of a low-cost solar organic Rankine cycle for remote power generation / S. Quoilin, M. Orosz, H. Hemond, V. Lemort // Sol. Energy. 2011. V. 85. Is. 5. P. 955–966. https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.010
- 11. **Performance** evaluation of a low-temperature solar Rankine cycle system utilizing R245fa / X.D. Wang, L. Zhao, J.L. Wang, W.Z. Zhang, X.Z. Zhao, W. Wu // Sol. Energy. 2010. V. 84. Is. 3. P. 353–364. https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.11.004
- 12. Calise F., Capuano D., Vanoli L. Dynamic simulation and exergo-economic optimization of a hybrid solar –

geothermal cogeneration plant // Energies. 2015. V. 8. Is. 4. P. 2606–2646.

https://doi.org/10.3390/en8042606

- Organic Rankine cycle coupling with a parabolic trough solar power plant for cogeneration and industrial processes / M. Borunda, O.A. Jaramillo, R. Dorantes, A. Reyes // Renewable Energy. 2016. V. 86. P. 651–663. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.041
- 14. Liu H., Shao Y., Li J. A biomass-fired micro-scale CHP system with organic Rankine cycle (ORC) – Thermodynamic modelling studies // Biomass Bioenergy. 2011. V. 35. Is. 9. P. 3985–3994. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.025
- Qiu G. Selection of working fluids for micro-CHP systems with ORC // Renewable Energy. 2012. V. 48. P. 565–570.
 - https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.006
- Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle / B.F. Tchanche, G. Papadakis, G. Lambrinos, A. Frangoudakis // Appl. Therm. Eng. 2009. V. 29. Is. 11–12. P. 2468–2476.

https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.025

- Thermodynamic analysis of a low-temperature organic Rankine cycle power plant operating at off-design conditions / Zh. He, Y. Zhang, Sh. Dong, H. Maa, X. Yu, Y. Zhang, X. Ma, N. Deng, Y. Sheng // Appl. Therm. Eng. 2017. V. 113. P. 937–951. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.006
- Baral S., Kim K.Ch. Thermodynamic modeling of the solar organic rankine cycle with selected organic working fluids for cogeneration // Distrib. Gener. Altern. Energy. J. 2014. V. 29. Is. 3. P. 7–34. https://doi.org/10.1080/21563306.2014.10879015

- Dai Y., Wang J., Gao L. Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery // Energy Convers. Manage. 2009. V. 50. Is. 3. P. 576–582. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.10.018
- Thermodynamic analysis and optimization of a solardriven regenerative organic Rankine cycle (ORC) based on flat-plate solar collectors / M. Wang, J. Wang, Y. Zhao, P. Zhao, Y. Dai // Appl. Therm. Eng. 2013. V. 50. Is. 1. P. 816–825.

https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.08.013

Boyaghchi F.A., Heidarnejad P. Thermoeconomic assessment and multi objective optimization of a solar micro CCHP based on Organic Rankine Cycle for domestic application // Energy Convers. Manage. 2015. V. 97. P. 224–234.

https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.036

- Selection of optimum working fluid for Organic Rankine Cycles by exergy and exergy-economic analyses / K. Darvish, M. Aliehyaei, F. Atabi, M.A. Rosen // Sustainability. 2015. V. 7. Is. 11. P. 15362–15383. https://doi.org/10.3390/su71115362
- 23. Nafey A.S., Sharaf M.A. Combined solar organic Rankine cycle with reverse osmosis desalination process: Energy, exergy, and cost evaluations // Renewable Energy. 2010. V. 35. Is. 11. P. 2571–2580. https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.034
- 24. Experimental and thermoeconomic analysis of smallscale solar Organic Rankine Cycle (SORC) system / S. Baral, D. Kim, E. Yun, K. Ch. Kim // Entropy. 2015. V. 17. Is. 4. P. 2039–2061. https://doi.org/10.3390/e17042039

Exergoeconomic Optimization of Low Temperature Solar Driven Organic Rankine Cycle

S. Upadhyaya^{*a*, *} and V. Gumtapure^{*a*}

^a Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Karnataka, Surathkal, Mangalore, 575025 India *e-mail: suhas.upa@gmail.com

Abstract – One of the most promising technologies in the field of distributed energy is the use of installations operating on the so-called organic Rankine cycle (ORC). The ORC technology is applicable for the utilization of low-potential thermal energy of natural or man-made origin. At the same time, in each specific case of using ORC systems, it is important to carry out technical and economic optimization of the project. In this paper, it is proposed to estimate the cost of electricity production by a ORC power block using an exergoeconomical model. To optimize the system parameters in order to minimize the electricity cost rate, the method of a genetic algorithm is used. The paper presents the results of optimization of the parameters of the ORC system, which includes a solar collector in combination with a ORC power block. R245fa is used as the working fluid in this analysis. With the help of a mathematical model, the electricity cost is calculated by comparing the costs for each of the components of the ORC system. For a given operating range of parameters of a ORC power block with an electric capacity of 1.03 kW, a minimum cost rate of 0.056 \$/(kW h) is determined. The optimal parameters of the working fluid in the ORC power block, at which the minimum electricity cost can be obtained, are also determined.

Keywords: Organic Rankine Cycle, working fluid, coolant, genetic algorithm, exergoeconomic, optimization, electricity cost rate, energy cost