

Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике

02, февраль 2014

DOI: 10.7463/0214.0699165

Белов Г. В., Дорохова М. А.

УДК 62-68

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

gbelov@yandex.ru

madorox@mail.ru

Введение

Потребление энергии в мире ежегодно увеличивается, при этом значительную часть ее составляет тепловая энергия, получаемая за счет сжигания углеводородных топлив и в результате контролируемого протекания ядерных реакций. Кроме того, имеются и другие источники низкопотенциальной тепловой энергии. К сожалению, значительная часть тепловой энергии используется крайне неэффективно, зачастую просто рассеивается в окружающей среде. В последние десятилетия большие усилия прилагаются для того, чтобы каким-то образом использовать низкопотенциальную энергию, которая в огромных количествах вместе с продуктами сгорания и охлаждающей жидкостью выбрасывается в окружающую среду. Все более широкое распространение получают альтернативные источники тепловой энергии – биотопливо, солнечная энергия, гидротермальная энергия и т.д.

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 обстоятельству 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 500-570К (230-300°C).

Даже беглый обзор литературы показывает, что направление энергетики, связанной с утилизацией остаточного тепла (тепловых отходов) и использования альтернативных источников энергии, в последнее время интенсивно развивается [1 - 4]. В настоящей работе сделана попытка анализа современных источников информации об органическом цикле Ренкина и возможностях его применения в альтернативной энергетике. Значительное внимание уделено вопросам выбора рабочего тела.

ПРИНЦИП РАБОТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОЦР

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, 2 приведены две схемы, иллюстрирующие идею ОЦР. На рисунке 1 изображена схема ОЦР без регенератора, на рис. 2 – схема ОЦР с регенератором. Принцип работы установки вполне очевиден. На рис. 1 насос закачивает рабочее тело в жидком состоянии в нагреватель, где при высоком давлении оно испаряется, далее пар попадает в турбину, в которой, расширяясь, совершает работу. Вал турбины вращается и приводит в действие электрогенератор. Отработанный пар охлаждается, и рабочее тело конденсируется. Далее вещество в жидком состоянии попадает в насос и цикл замыкается. В схеме на рис. 2 рабочее тело на выходе из турбины попадает в регенератор, где отдает часть тепловой энергии сжатой жидкости, которая направляется в нагреватель. Тепловая энергия 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 же потоки энергии невелики, предпочтительнее использовать поршневой детандер. Кроме того, поршневые детандеры более приспособлены для работы в условиях флуктуаций тепловых потоков от внешнего источника теплоты.

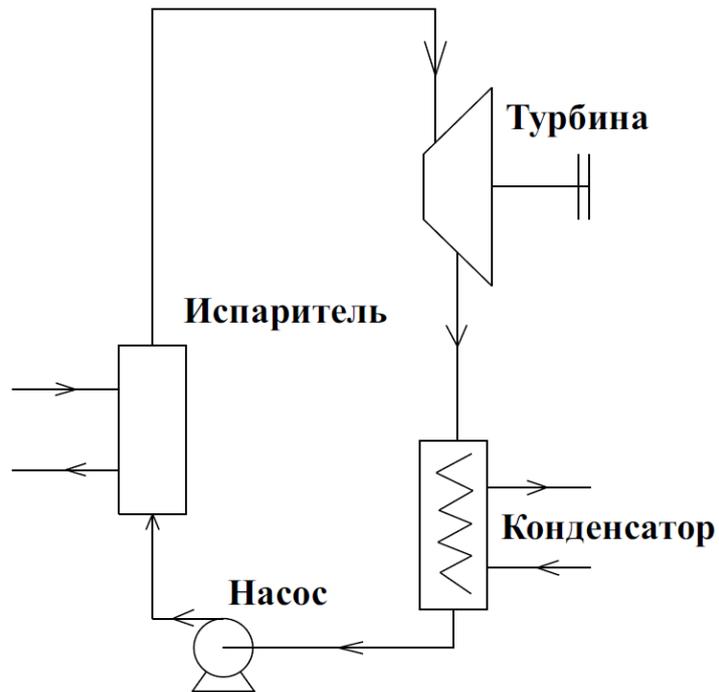


Рис. 1. Схема ОЦР без регенератора.

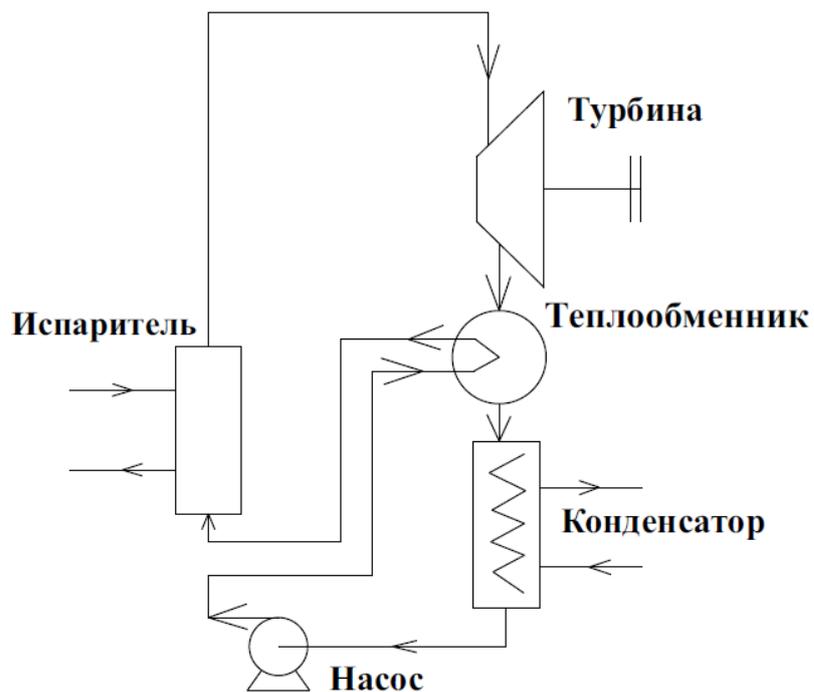


Рис. 2. Схема ОЦР с регенератором.

Схема органического цикла Ренкина с перегревом в $T-s$ координатах изображена на рис. 3.

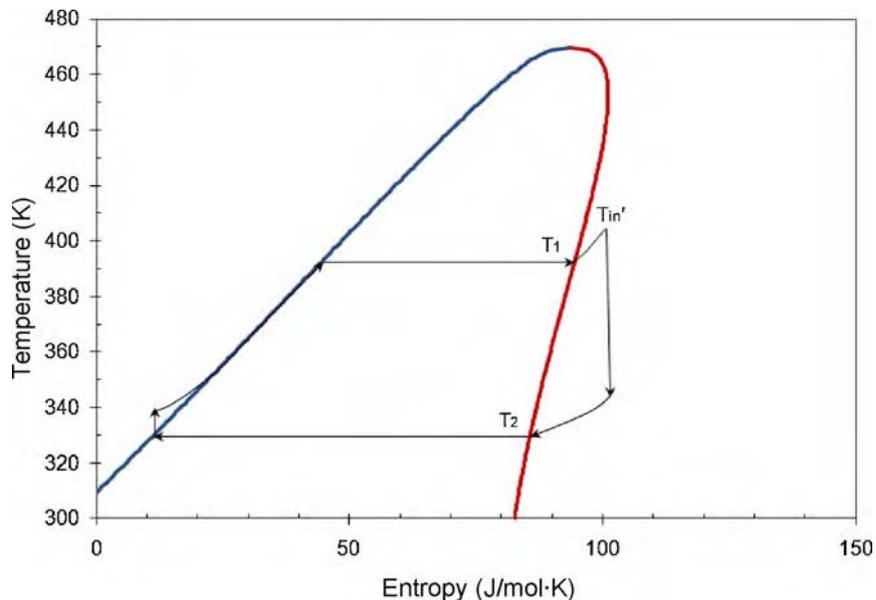


Рис. 3. Органический цикл Ренкина с перегревом, [5].

Результаты экспериментального исследования энергетической и эксергетической эффективности установки, в которой осуществляется усовершенствованный ОЦР приводятся в работе [6]. Исследована термическая эффективность установки при температурах источника теплоты 100°C, 90°C, 80°C и 70°C. Показано, что при температуре источника тепловой энергии 80°C термический КПД может достигать значения 7.4%, при этом изоэнтропный (внутренний относительный) КПД турбины равен примерно 68%. Установлено, что основные потери эксергии приходятся на теплообменники, в которых теряется до 74% эксергии. Общая эксергетическая эффективность системы составляет примерно 40%. В качестве рабочего тела в экспериментальной установке использовался хладагент HCFC-123.

Эксергетическую эффективность обычно вычисляют по формуле

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{\dot{W}}{\dot{E}_{\text{ex}}} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}[(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)]},$$

где \dot{m} - поток массы, \dot{W} - суммарная мощность установки, h - энтальпия, s - энтропия, T_0 - температура окружающей среды, индекс i соответствует состоянию рабочего тела на входе в устройство, индекс 0 - состоянию рабочего тела при температуре и давлении окружающей среды.

В работе [7] эксплуатационные характеристики установки, в которой осуществляется ОЦР и ее производительность при генерации электроэнергии, исследованы экспериментально. В качестве рабочего тела использован хладагент R245fa. Температура рабочего тела в испарителе варьировалась в пределах от 77°C до 83°C. В серии экспериментов изучены эффективность цикла и

турбины. Установлено, что максимальное значение термической эффективности цикла может достигать 5.22%, изоэнтропного КПД турбины 78.7%, а генерируемой электрической мощности 32.7кВт. Изучено влияние различных факторов на производительность установки.

ПРИМЕНЕНИЕ ОЦР

Достоинствами цикла Ренкина по сравнению с циклами Брайтона, Стирлинга и Калины являются относительная простота реализации, дешевизна оборудования и эффективность. Главным достоинством ОЦР является возможность его адаптации к различным источникам тепловой энергии. За счет варьирования рабочего тела его можно использовать в широком диапазоне температур и давлений. В частности, ОЦР можно использовать в бинарном цикле, как в высокотемпературной, так и в низкотемпературной области. Рассмотрим наиболее перспективные области применения ОЦР.

Использование солнечной энергии.

Солнечная энергия все шире используется для получения электроэнергии (фотовольтаика – получение электроэнергии с помощью фотоэлементов). Однако есть и другие возможности превращения энергии излучения Солнца в электроэнергию. Один из способов предполагает концентрацию солнечных лучей при помощи изогнутых зеркал, нагрев рабочего тела и превращение тепловой энергии в электрическую в ОЦР, [8].

ОЦР можно использовать и для опреснения морской воды. В этом случае турбина приводит в действие установку обратного осмоса, а солнечная энергия обеспечивает нагрев рабочего тела в ОЦР. В работе [9] приведены результаты анализа и оптимизации параметров ОЦР, используемого для опреснения воды методом обратного осмоса. Для испарения рабочего тела в цикле используется солнечная энергия. При проведении анализа рассмотрены двенадцать веществ-кандидатов на роль рабочего тела ОЦР. Представленные в статье результаты могут быть полезны при технико-экономическом анализе, выборе рабочего тела ОЦР, определении размеров установки и конфигурации солнечного энергетического цикла.

Биотопливо и ОЦР.

Биомасса производится в большом количестве в качестве побочного продукта на сельскохозяйственных и некоторых промышленных предприятиях. Одним из способов утилизации биомассы является ее сжигание с получением тепловой энергии, которая затем преобразуется в электроэнергию. Поскольку биотопливо имеет сравнительно низкую плотность, его выгоднее использовать в месте получения. Для использования биотоплива вполне подходят двигатели с внешним источником энергии (двигатель Стирлинга, установка ОЦР). Стоимость биотоплива существенно ниже стоимости горючих ископаемых. Тем не менее, применение биотоплива не всегда оправдано с экономической точки зрения.

Для автономных источников электроэнергии целесообразнее использовать биотопливо в теплофикационном цикле с генерацией электроэнергии и получением тепловой энергии или в цикле тригенерации, [10]. Возможность получения тепла в ОЦР в качестве побочного продукта при генерации электроэнергии путем сжигания биотоплива, видимо, можно считать преимуществом. Получаемое тепло можно использовать для обогрева помещений и в технических целях. Мощность установок по утилизации биомассы обычно не превышает 6-10МВт, из которых на долю электричества приходится около 1-2МВт. Для таких мощностей применение традиционного паротурбинного цикла Ренкина нецелесообразно. Схема установки для утилизации биомассы в ОЦР приводится на рис. 4.

Тепловая энергия, выделяющаяся при сгорании биотоплива, через теплообменник передается промежуточному теплоносителю, в качестве которого выступает термальное масло, при этом температура в теплообменнике варьируется в диапазоне 150°С-320°С. Затем тепловая энергия при помощи термального масла передается в ОЦР, где служит для испарения рабочего тела. Далее рабочее тело в виде пара расширяется в турбине, проходит через рекуператор, подогревая рабочее тело в жидком состоянии, и охлаждается в конденсаторе. Нагретая вода, которая охлаждает рабочее тело в конденсаторе, может быть использована для бытовых целей. Для того чтобы потери энергии продуктов сгорания биотоплива были минимальны, желательно максимально охладить их потоками рабочего тела и входящего воздуха. На схеме, изображенной на рис. 4, для этой цели используются экономайзер и предварительный нагреватель воздуха.

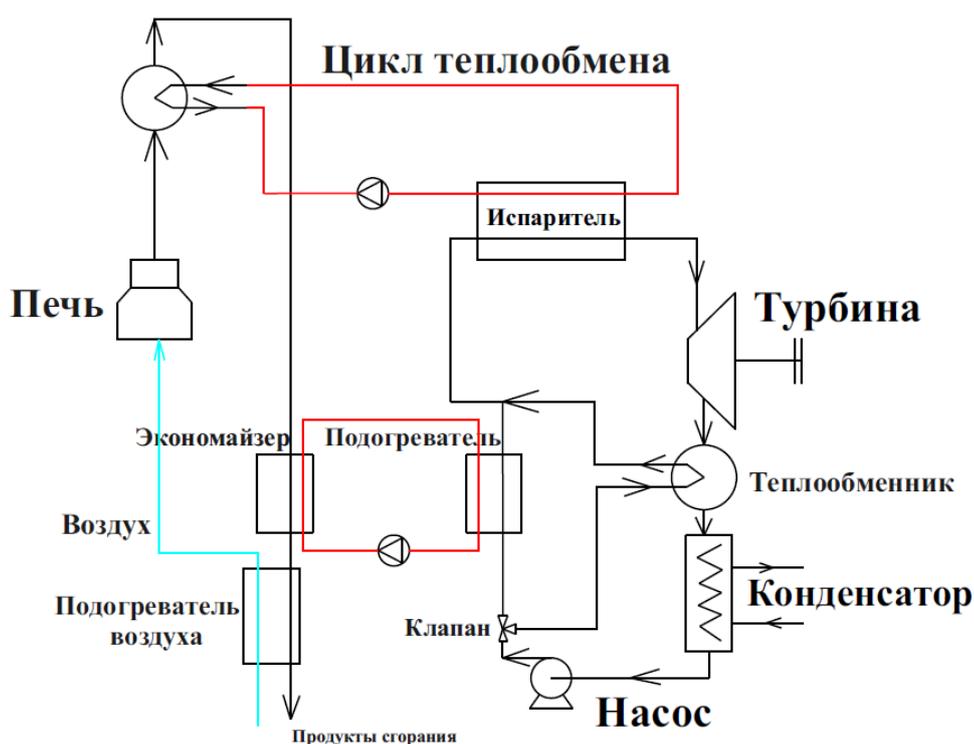


Рис. 4. Принцип работы теплофикационной установки, работающей по ОЦР.

Перспективы применения твердых топлив из биомассы для работы ОЦР рассмотрены в работе [11]. Отмечается, что в зависимости от вида сырья и применяемой технологии топливо из биомассы можно получать в различном фазовом состоянии: твердом, жидком и газообразном. Авторы рекомендуют использовать биотопливо в виде пеллет, которые получают из древесины и различных видов биомассы. Однако для генерации электричества можно использовать не только биотопливо, но и биогаз - синтетический газ, состоящий главным образом из CO, CO₂, CH₄ и H₂. В работе [2] приводятся оценки эффективности автономной теплофикационной установки, работающей на биотопливе: около 18% химической энергии топлива превращается в электричество, примерно 70% уходит на нагрев воды и лишь 12% выбрасывается в окружающую среду с продуктами сгорания.

Геотермальная энергия.

На нашей планете существует большое количество геотермальных источников. В некоторых случаях имеется возможность непосредственного использования пара геотермального источника в турбине. Однако чаще температура воды в источнике недостаточно высока, и здесь на помощь приходит ОЦР. В настоящее время существует несколько гидротермальных электростанций, использующих энергию низкоэнthalпийных гидротермальных источников, в которых реализованы ОЦР и цикл Калины.

Температура воды в геотермальных источниках имеет различную температуру, от нескольких десятков до 300°C. Принято считать, что нижняя температурная граница, при которой имеет смысл использование тепловой энергии геотермального источника, составляет 80°C. Схема установки с ОЦР, использующей энергию геотермального источника, приводится на рис.5.

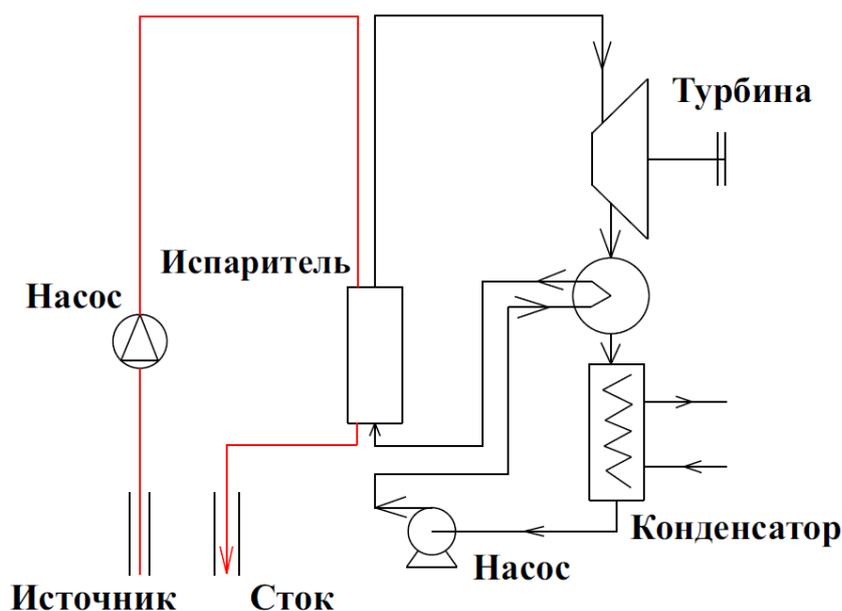


Рис. 5.Схема установки с ОЦР, использующей геотермальную энергию.

Вода из источника закачивается в теплообменник-испаритель, где происходит нагрев и испарение рабочего тела. После этого вода закачивается обратно в землю.

Как отмечается в [12] идея применения фреона в качестве рабочего тела паросиловой установки для выработки электроэнергии впервые была реализована в 1967 году в СССР на Паратунской опытно-промышленной геотермальной электростанции.

В ряде работ рассматривается эффективность энергетических установок, использующих тепло геотермальных источников. В статье [13] приводятся результаты сравнения эффективности нескольких реально действующих установок. Показано, что при работе с одним и тем же источником тепловой энергии цикл Калины лишь незначительно (на 3%) эффективнее, чем ОЦР.

В работе [14] выполнен эксергетический анализ геотермальной энергетической установки. Установлены те места установки, в которых эксергия уничтожается в наибольшей степени.

Сравнительный анализ нескольких циклов установок, использующих энергию геотермальных источников, выполнен в работе [15]. В частности, рассмотрены обычный ОЦР, регенеративный ОЦР, ОЦР с внутренним теплообменником. Для каждого цикла разработана термодинамическая модель. Сравнение циклов проводилось с использованием термического КПД, и эксергетического КПД.

В работе [16] изучены термодинамические и экономические аспекты докритического и сверхкритического ОЦР для геотермальной энергетической установки. Для 16 видов рабочих тел выполнена параметрическая оптимизация. Установлено, что выбор наилучшего рабочего тела существенно зависит от используемых критериев оптимизации.

Утилизация тепловых отходов крупных предприятий.

Промышленные предприятия выбрасывают в окружающую среду большое количество тепловой энергии вместе с потоками продуктов сгорания и охлаждающей жидкости при относительно низкой температуре. Это обстоятельство зачастую 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. Как отмечается в [1], если на ТЭЦ используется только 37% энергии топлива, это означает, что 63% этой энергии теряется безвозвратно. Поэтому в последнее время прилагаются большие усилия по утилизации тепловых отходов предприятий промышленности, с возможностью генерации электроэнергии.

Многочисленные исследования показывают, что существует довольно много промышленных производств с неиспользуемыми запасами тепловой энергии. Например, очень энергоемким является производство цемента. На долю этого сектора экономики приходится 12-15% общего количества энергии, потребляемой промышленностью, при этом до 15% энергии топлива рассеивается в окружающую среду, [17]. Температура продуктов сгорания на выходе ГТУ обычно превышает 500°C, предприятия нефтехимической промышленности выбрасывают газы с температурой 150-300°C. ОЦР и в этом случае предоставляет возможность использования остающейся тепловой энергии. Однако утилизация этих запасов в общем случае представляет собой непростую задачу.

Утилизация тепловых отходов ДВС.

Двигатели внутреннего сгорания превращают в механическую энергию лишь около 30% химической энергии топлива, от 15 до 32% энергии рассеивается в окружающую среду через радиатор, остальную энергию уносят выхлопные газы с температурой от 400°C до 900°C. Эффективный способ утилизации тепловой энергии отработанных продуктов сгорания в этом случае также предоставляет ОЦР. Идея использования ОЦР для этой цели не нова. Еще в 1970-х годах был создан прототип установки, в которой рабочее тело нагревалось теплом продуктов сгорания, при этом было достигнуто сокращение расхода топлива на 12.5% [2]. Современные системы утилизации тепловых отходов ДВС дают возможность использовать не только тепло выхлопных газов, но и тепловую энергию системы охлаждения. Как отмечается в [2] за счет применения установки с ОЦР удалось повысить мощность двигателя на 19.2 кВт, при этом его термическая эффективность возросла с 28.9% до 32.7%.

В статье [18] представлены результаты моделирования низкотемпературного ОЦР, использующего тепловую энергию продуктов сгорания дизельного двигателя. В качестве рабочего тела использован хладагент R245fa. Исследована работа комбинированной установки дизельный двигатель+ОЦР. Установлено, что около 75% энергии выхлопных газов и 9.5% энергии охлаждающей воды можно превратить в полезную работу.

Результаты сравнительного теоретического анализа цикла Калины и ОЦР в сочетании с дизельным двигателем приведены в статье [19]. В качестве рабочего тела использован гексаметилдисилоксан, источник энергии - продукты сгорания дизельного двигателя, который приводит в действие электрогенератор мощностью 8900кВт. Массовый расход продуктов сгорания 35кг/с, температура 346°C. Для проведения сравнительного анализа конструкции установок, реализующих цикл Калины и ОЦР, были выбраны относительно простыми. В результате

проведенного моделирования установлено, что применение цикла Калины позволяет получить дополнительную мощность 1615кВт, а ОЦР - 1603кВт. При этом, однако, максимальное давление в цикле Калины составляло 100бар, а в ОЦР - только 10бар. Таким образом, использование ОЦР для утилизации тепловой энергии продуктов сгорания дизельного двигателя более обоснованно.

Обзор результатов экспериментальных и теоретических исследований применения ОЦР для утилизации энергии продуктов сгорания ДВС приводится в статье [20]. На основании проведенных авторами работы экспериментов было установлено, что применение связки ДВС+ОЦР позволяет не только повысить степень использования энергии топлива, но и сократить содержание CO_2 и NO_x в выхлопных газах в среднем на 18%.

В качестве конкурирующего способа утилизации тепловой энергии продуктов сгорания можно рассматривать термоэлектрический генератор, работающий на основе эффекта Зеебека. Главными его преимуществами являются простота, малый вес и компактность по сравнению с установкой ОЦР. Однако для изготовления термоэлектрического генератора необходимо использовать дорогостоящие материалы, содержащие редкоземельные металлы. Кроме того, принято считать, что такие генераторы отличаются низкой эффективностью работы.

Существенной особенностью устройства использования энергии продуктов сгорания ДВС являются ограничения, накладываемые на его размеры, поскольку это устройство должно "вписываться" в отведенное для него место. Сравнение различных способов утилизации тепловой энергии продуктов сгорания ДВС приводится в работе [21]. Рассмотрена история попыток использования ОЦР для этой цели. Авторы приходят к выводу, что наилучшего со всех точек зрения способа утилизации тепловых отходов не существует. Утверждается, что во многих случаях ОЦР является вполне конкурентоспособным способом ее использования.

Комбинированный цикл.

ОЦР можно использовать совместно с ГТУ или ДВС для утилизации тепловой энергии продуктов сгорания. Суммарный цикл ГТУ+ОЦР или ДВС+ОЦР является по сути дела комбинированным циклом с высокой термической эффективностью. Как показано в [22] сочетание микро-турбины мощностью 100 кВт позволяет получить дополнительную мощность до 45 кВт за счет использования тепловой энергии выхлопных газов.

В статье [23] рассматривается возможность использования ОЦР в низкотемпературной части комбинированного цикла (цикла парогазовой установки). При анализе рассмотрены следующие рабочие тела: R113, R245, изобутен, толуол, циклогексан и изопентан. Наилучшие

параметры цикла были получены при использовании толуола и циклогексана. Приводятся экономические соображения относительно возможности эксплуатации парогазовой установки с ОЦР. Отмечается, что суммарная эффективность комбинированного цикла зависит и от реализации высокотемпературной его части. Показано, что заданное значение мощности турбины можно получить не только за счет повышения температуры рабочего тела на входе в турбину, но и за счет утилизации тепловой энергии продуктов сгорания газотурбинной установки при более низкой температуре рабочего тела на входе в турбину.

ВЫБОР РАБОЧЕГО ТЕЛА

Выбор рабочего тела для ОЦР зависит от многих факторов, в частности, от источника энергии, диапазона рабочих температур и давлений и мощности установки. Вопросы выбора рабочего тела для ОЦР рассмотрены во многих работах, см. например [5, 24 - 28 и др.]. В большинстве случаев для сравнения характеристик перспективных рабочих тел используется термодинамическая модель цикла. При этом главным критерием сравнения зачастую является термическая эффективность цикла, которая существенно зависит от физико-химических свойств рабочего тела. К сожалению, трудно однозначно сказать, какие именно свойства вещества оказывают наибольшее влияние на эффективность цикла. В общем случае при выборе рабочего тела необходимо принять во внимание следующие соображения.

1. Для данного рабочего диапазона температур удельная работа цикла должна быть максимальной. Желательно, чтобы теплота испарения рабочего тела была как можно больше.
2. Низкая вязкость жидкой и паровой фаз должна обеспечить малые потери на трение и большое значение коэффициента теплоотдачи.
3. Высокая теплопроводность рабочего тела позволит обеспечить эффективный нагрев и охлаждение его в теплообменниках.
4. Давление насыщенных паров рабочего тела в цикле Ренкина не должно быть ни слишком большим, ни очень маленьким, поскольку в противном случае могут возникнуть проблемы создания вакуума и обеспечения прочности и герметичности трубопроводов и арматуры.
5. Важным требованием к рабочему телу является термическая стабильность в области высоких температур. К сожалению, многие органические соединения при нагревании претерпевают химические превращения, свойства их также меняются.
6. Вещество не должно замерзать во всем диапазоне рабочих температур. Поэтому тройная точка рабочего тела должна лежать ниже наименьшей температуры цикла.

7. Рабочее тело не должно быть токсичным и легковоспламеняющимся, а попадание его в окружающую среду не должно вызывать загрязнения.

8. Желательно, чтобы рабочее тело было недорогим и легкодоступным. В этом отношении вещества, используемые в холодильной промышленности, являются хорошими кандидатами на роль рабочего тела в ОЦР.

Напомним, что главными достоинствами воды как рабочего тела являются доступность, низкая цена, экологичность, вода не токсична, не горит, химически стабильна, имеет низкую вязкость. Главными недостатками воды можно считать необходимость нагревателя с высокой температурой, высокое давление в цикле, применение цикла Ренкина на водяном паре экономически целесообразно только для установок относительно большой мощности.

С учетом сказанного выше можно утверждать, что при выборе рабочего тела для реализации в ОЦР нельзя исходить только из соображений термической эффективности. Задача выбора оптимального вещества является многокритериальной, она рассмотрена подробно в ряде работ, см. например [29, 30]. В частности, необходимо принимать во внимание также площадь теплообменника, габариты турбины, стоимость установки и стоимость ее эксплуатации. Таким образом, экономические соображения могут обуславливать совершенно другие характеристики рабочего тела, отличающиеся от тех, которые были получены по результатам термодинамического анализа.

Несмотря на то, что в литературе рассмотрено довольно много веществ, которые в принципе можно использовать в ОЦР, только несколько из них применяются в коммерческих установках, работающих по ОЦР. К их числу относятся HFC-134a, HFC-245fa, OMTS (октаметилтрисилоксан), толуол, Solkatherm (азеотропный раствор).

В работе [24] приводятся результаты анализа возможностей использования в ОЦР более 30 веществ (алканы, фторированные алканы, эфиры и фторированные эфиры) в диапазоне температур 30-100°C, который характерен для геотермальных источников энергии. В статье [26] исследованы возможности использования 20 веществ в ОЦР с максимальной температурой, не превышающей 75°C.

Применение твердого биотоплива для установок, работающих по ОЦР, имеет некоторые особенности. Эксплуатационные характеристики перспективных рабочих тел для таких установок анализируются в работе [25]. Максимальная температура цикла лежит в диапазоне от 250°C до 350°C. Следует отметить, что при анализе во внимание принимались термическая эффективность

цикла и максимальное количество утилизируемой тепловой энергии. Некоторые характерные температуры для установки, работающей на твердом биотопливе по ОЦР, приведены в табл. 1, [25]. Высокая температура рабочего тела в конденсаторе (последняя строка таблицы) дает возможность нагревать воду для технических целей. Установлено, что для установок, работающих в указанном интервале температур, максимальное давление лежит в области 9-15 бар. Для этого диапазона параметров наилучшую эффективность цикла можно получить при использовании в качестве рабочего тела веществ из семейства алкилбензолов.

Табл. 1. Характерные температуры ОЦР на твердом биотопливе.

Температура пламени	1200К
Максимальная температура термального масла	630К
Максимальная температура рабочего тела в ОЦР	600К
Температура в конденсаторе	370К

В статье [5] приведены результаты исследования 35 рабочих тел обычного и сверхкритического ОЦР, а также критерии выбора веществ – кандидатов на роль рабочего тела ОЦР. При проведении анализа, в частности, принимались во внимание термодинамические свойства веществ, стабильность, влияние на окружающую среду, безопасность, доступность, стоимость. Авторы пишут, что среди рассмотренных веществ нет ни одного, которое в полной мере отвечало бы предъявляемым требованиям. Поэтому при выборе рабочего тела решение должно быть компромиссным. Отмечается, что в зависимости от наклона линии насыщенного пара на $T-s$ диаграмме вещества можно разделить на «сухие», «влажные» и «изоэнтропные». Если обозначить тангенс угла наклона $\xi = \frac{ds}{dT}$, то для «сухих» веществ $\xi > 0$, для «влажных» $\xi < 0$, а для «изоэнтропных» $\xi = 0$, рис. 6. В результате анализа установлено, что наибольшее значение при выборе рабочего тела имеют величина критической температуры и значение тангенса угла наклона ξ . В [5] приводится таблица, содержащая параметры критической точки, энтальпии испарения и величины ξ при 320К для исследованных веществ. Авторы утверждают, что свойства рабочего тела очень сильно влияют на эффективность цикла.

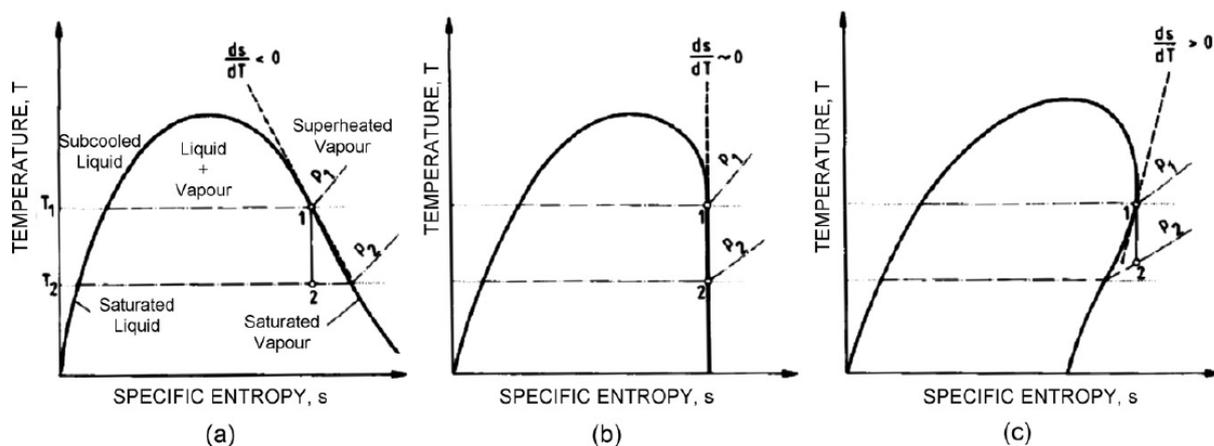


Рис. 6. T - s диаграммы веществ, (а)- "влажного", (б) - "изоэнтропного", (с) - "сухого", [1].

В статье [31] описывается процедура параметрической оптимизации ОЦР с перегревом и приводятся результаты анализа процессов с использованием в качестве рабочего тела хладагентов R-12, R-123, R-134a и R-717. При проведении оптимизации, в частности, учитывались эксергетическая эффективность, потери на необратимость, массовый расход. Установлено, что для рассмотренного набора параметров наилучшие характеристики процесса можно получить, если в качестве рабочего тела используется хладагент R-123.

В работе [29] рассматривается зависимость эффективности ОЦР от термодинамических, теплофизических и транспортных свойств рабочего тела. Установлено, что эффективность цикла выше в том случае, когда в качестве рабочего тела применяется "сухое" или "изоэнтропное" вещество, поскольку его расширение в турбине не сопровождается конденсацией, которая имеет место при расширении "влажного" вещества. Наличие капель конденсата в рабочем теле оказывает негативное влияние на условия течения и вызывает преждевременный износ оборудования. Авторы приходят к выводу, что благоприятное влияние на эффективность турбины оказывают высокое значение фактора сжимаемости вещества на входе в турбину, большая величина изобарной теплоемкости рабочего тела в состоянии идеального газа, большое значение молярной массы рабочего тела. Отмечается также, что низкое значение молярного объема рабочего тела на линии насыщения жидкости позволяет уменьшить работу насоса.

Работа [30] посвящена рассмотрению вопросов выбора вещества для рабочего тела ОЦР и параметрической оптимизации с использованием многокритериальной модели. Были рассмотрены 13 веществ. Установлено, что для рабочего диапазона температур 100°C - 180°C оптимальным веществом является R123. При температуре выше 180°C наилучшие показатели цикла получены для R141b. На основании проведенного анализа для 13 веществ авторы приходят к выводу, что при температуре источника теплоты ниже 100°C использование ОЦР становится неэкономичным.

В статье [32] предложен систематический подход к проектированию молекул и выбору оптимальных рабочих тел для ОЦР, основанный на использовании инструментов computer aided molecular design (компьютерного молекулярного дизайна). Указанная методология предполагает сочетание метода групповых вкладов и технологии многокритериальной оптимизации для отбора веществ - кандидатов на роль рабочего тела. При отборе веществ учитывались оптимальные характеристики ОЦР, экономические, эксплуатационные характеристики, показатели безопасности и влияния на окружающую среду. Идея компьютерного молекулярного дизайна заключается в систематическом комбинировании функциональных групп молекул, в результате которого создаются гипотетические молекулы с определенной структурой и физико-химическими свойствами. Свойства молекул можно рассчитать или оценить при помощи методов групповых вкладов. На основании полученных оценок свойств веществ можно рассчитать рабочие характеристики цикла и получить оценки экономичности процесса и безопасности рабочего тела. При проведении исследования авторы [32] принимали во внимание следующие требования к свойствам рабочего тела: плотность рабочего тела (должна быть как можно больше, чтобы обеспечить максимальный поток массы при уменьшении габаритов установки), энтальпия испарения вещества (должна быть как можно больше), теплоемкость рабочего тела в жидком состоянии (должна быть как можно меньше), вязкость рабочего тела в жидком и парообразном состояниях (должна быть как можно меньше), теплопроводность рабочего тела (должна быть как можно больше), максимальное рабочее давление цикла (должно быть как можно меньше, чтобы минимизировать затраты на оборудование). Также принимались во внимание температура плавления, критическая температура, термический КПД цикла, потенциал разрушения озонового слоя (ozone depletion potential), потенциал глобального потепления (global warming potential), показатели токсичности и воспламеняемости. На основании проведенного анализа предложен список веществ – кандидатов на роль рабочего тела для ОЦР. Главным достоинством такого подхода является возможность анализа максимально широкого списка веществ.

В работе [33] приведены результаты анализа сверхкритического органического цикла Ренкина, рассмотрены 18 органических веществ. При проведении анализа во внимание принимались суммарная мощность установки, эксергетическая эффективность, размеры турбины, параметры испарителя и конденсатора. Установлено, что повышение температуры на входе в турбину повышает суммарную мощность установки и ее эксергетическую эффективность. Результаты анализа показали, что с учетом принятых во внимание факторов, в качестве рабочего тела для сверхкритического ОЦР можно рекомендовать хладагенты R152a и R143a. Утверждается, что термическая эффективность ОЦР обычно не превышает 24%.

СРАВНЕНИЕ ОЦР И ПАРОВОГО ЦИКЛА РЕНКИНА

Как отмечается в работе [3], сравнение ОЦР с другими термодинамическими циклами не вполне корректно, поскольку одной из главных задач ОЦР является утилизация остаточного тепла. Тем не менее, полезно понять, в чем состоит основная разница между ОЦР и паровым циклом Ренкина. T - s диаграмма линий насыщения воды и некоторых органических рабочих тел, которые используются в ОЦР, изображена на рис. 7. Как видно из рисунка, линия насыщения водяного пара имеет отрицательный наклон (полого убывает с ростом энтропии). Для многих органических веществ эта кривая практически вертикальна. Благодаря этому обстоятельству, в конце процесса расширения в турбине пар остается в перегретом состоянии, т.е. не возникает проблемы влажного пара, которая имеет место в паротурбинном цикле и для решения которой используется перегрев пара. Однако в качестве рабочих тел применяются и органические вещества с отрицательным наклоном линии насыщенного пара. Для таких рабочих тел цикл Ренкина также осуществляется с перегревом.

Из рисунка видно также, что энтальпия испарения воды существенно выше энтальпии испарения органических рабочих тел, поэтому удельная работа цикла с использованием органического вещества относительно мала. Для повышения мощности установки, работающей по ОЦР, необходимо увеличивать массовую скорость рабочего тела, что, в свою очередь, увеличивает мощность, потребляемую насосом.

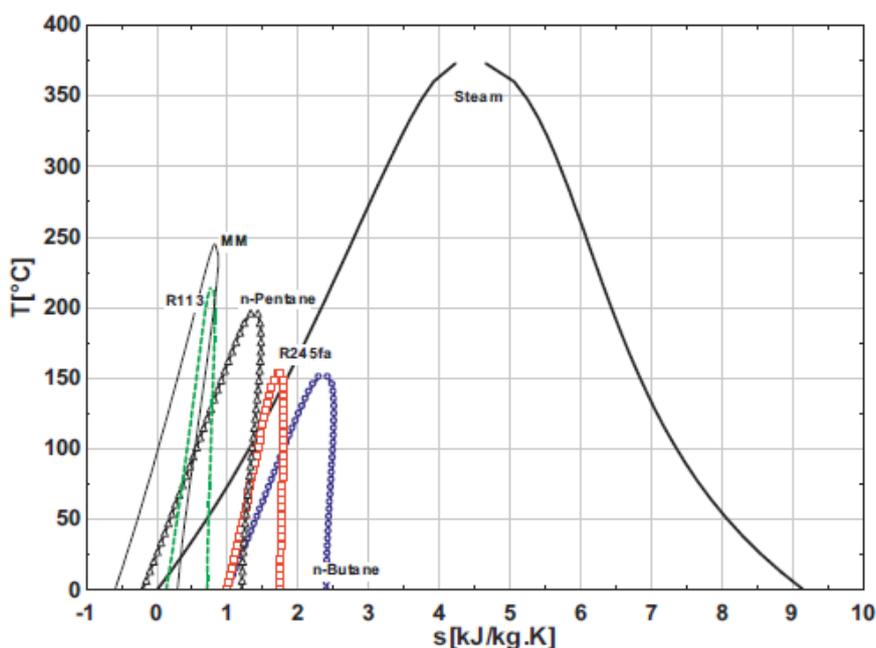


Рис. 7. T - s диаграмма воды и некоторых органических рабочих тел, [4].

С другой стороны, благодаря малой энтальпии испарения органических рабочих тел установки с ОЦР имеют относительно простую конструкцию. В настоящее время в таких установках, как правило, применяются одно- и двухступенчатые турбины. Кроме того, следствием

малой энтальпии испарения является относительно небольшая скорость вращения турбины, что позволяет соединять вал турбины с электрогенератором напрямую, без передаточного механизма.

В табл. 2 для сравнения приведены термодинамические свойства воды и некоторых веществ, применяемых в ОЦР.

Табл. 2. Термодинамические свойства некоторых рабочих тел ОЦР.

Рабочее тело	Формула	$t_{кр}, ^\circ\text{C}$	$p_{кр}, \text{бар}$	$t_{кип}, ^\circ\text{C}$ (1 бар)	$\Delta h_{исп}, \text{кДж/кг}$ (1 бар)
Вода	H_2O	373.9	220.6	100	2257.5
Толуол	C_7H_8	318.7	41.1	110.7	365.0
R245fa	$\text{C}_3\text{H}_3\text{F}_5$	154.1	36.4	14.8	195.6
n-пентан	C_5H_{12}	196.6	33.7	36.2	361.8
циклопентан	C_5H_{10}	238.6	45.1	49.4	391.7
Solkatherm	раствор	177.6	28.5	35.5	138.1
OMTS		291.0	14.2	152.7	153.0

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОЦР

При газодинамическом анализе процессов течения в газовых турбинах обычно используется модель идеального газа. Результаты, полученные с использованием этой модели, как правило, удовлетворительно согласуются с данными эксперимента. Последнее обстоятельство объясняется тем, что температура воздуха в турбине достаточно высока, а давление не слишком велико. В работе [34] приводятся результаты сравнительного анализа расчета некоторых параметров рабочего тела в потоке для ОЦР, полученные с использованием уравнений состояния идеального газа, модифицированного уравнения Пенга-Робинсона [35] и прецизионного уравнения Спана-Вагнера [36]. Было установлено, что в некоторых случаях результаты расчетов практически совпадают. Однако во многих случаях использование модели идеального газа при анализе процессов течения рабочего тела в турбине в области высоких давлений позволяет лишь приближенно определить некоторые параметры потока (например, число Маха, фактор сжимаемости). Результаты, полученные в работе [34] с использованием уравнений состояния Пенга-Робинсона и Спана-Вагнера, во многих случаях удовлетворительно согласуются друг с другом. Видимо, наиболее точные значения вычисляемых величин можно получить при помощи уравнения Спана-Вагнера, которое, однако, является и наиболее громоздким. Компромиссным решением при выборе уравнения состояния реального газа для моделирования процессов такого рода следует считать модифицированное уравнение Пенга-Робинсона.

В статье [37] рассмотрены вопросы динамического моделирования и стратегия оптимального управления характеристиками ОЦР. При анализе ОЦР обычно рассматривается стационарный режим работы. Однако реальная установка может работать с источником теплоты с переменной температурой, нагрузка установки также может изменяться. Поэтому важно уметь анализировать переходные процессы в ОЦР. Результаты моделирования показали, что при изменении внешних параметров в некоторых случаях эффективность ОЦР резко падает, поэтому следует продумать систему управления насосом и турбиной. Наилучшие результаты в модельном эксперименте были получены для случая, когда оптимизировалась температура испарения рабочего тела.

Однако следует иметь в виду, что при проведении модельного эксперимента обычно не учитываются тепловые потери и потери на трение. Поэтому реальные установки утилизации тепловых отходов имеют существенную меньшую мощность, чем их идеализированные аналоги. В частности, если по результатам моделирования применение ОЦР позволяет повысить эффективность установки на 15-20%, то в реальной установке повышение эффективности не превышает 7-10%. Тем не менее, применительно к двигателям внутреннего сгорания это означает экономию топлива до 10%, [21].

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОЦР

Используемые в настоящее время установки с ОЦР, как правило, относительно просты, они работают в докритическом диапазоне температур и давлений рабочего тела, в качестве которого обычно используется чистое вещество. В некоторых случаях цикл проводится с регенерацией тепловой энергии.

Продолжающиеся поиски веществ, которые можно использовать в качестве рабочих тел перспективных установок, позволяют надеяться на повышение эффективности термодинамического цикла, снижение стоимости эксплуатации установки и расширение областей применения ОЦР. Для теоретического изучения физико-химических свойств веществ в окрестности критической точки широко применяются уже существующие и создаются новые уравнения состояния реального газа, [34].

В работах [38, 39] обсуждаются возможности усовершенствования ОЦР. Предложена схема с дросселированием нагретой жидкости (Organic Flash Cycle), которая обеспечивает уменьшение потерь тепловой энергии в процессе нагрева. Проведен термодинамический и эксергетический анализ модифицированного цикла с использованием прецизионных уравнений состояния реального газа (BACKONE, Спана-Вагнера, REFPROP). Рассмотрены возможности использования

в качестве рабочего тела 10 ароматических углеводородов и силоксанов. Авторы утверждают, что применение новой схемы позволяет повысить эффективность утилизации тепловых отходов на 5-20% по сравнению с оптимизированным ОЦР.

Одним из недостатков имеющихся установок является их неэффективная работа при частичной загрузке. Таким образом, одной из задач, которая требует решения, является повышение эффективности установки ОЦР с регулируемой мощностью.

Выводы

Применение органического цикла Ренкина позволяет использовать низкопотенциальную тепловую энергию выхлопных газов, геотермальных источников, других тепловых потоков с относительно невысокой температурой. Объединение ОЦР с ДВС дает возможность повысить эффективность использования энергии топлива и сократить количество токсичных примесей в выхлопных газах. Выбор рабочего тела для ОЦР существенно влияет на его характеристики и определяется диапазоном эксплуатационных температур и давлений цикла. Достоинствами ОЦР являются

- отсутствие необходимости перегрева рабочего тела,
- относительно низкая температура рабочего тела на входе в турбину,
- высокая плотность рабочего тела, что позволяет сделать установку более компактной,
- высокое давление пара при конденсации,
- более простая конструкция турбины,
- возможность утилизации тепловой энергии при низкой температуре.

В заключение приведем ссылку на сайт проекта, целью которого является разработка органических циклов Ренкина нового поколения (The Next Generation Organic Rankine Cycles) www.orcnex.be, где можно найти дополнительные материалы по теме настоящей публикации.

Список литературы

1. Velez F., Segovia J.J., Martin M.C., Antolin G., Chejne F., Quijano A. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16, no. 6. P. 4175- 4189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.022>
2. Quoilin S., Van Den Broeck M., Declaye S., Dewallefa P., Lemorta V. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 22. P.168-186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028>

3. Янчошек Л., Кунц П. Органический цикл Ренкина: использование в когенерации // Турбины и дизели. 2012. № 2. С. 50-53.
4. Tchanche B.F., Lambrinos Gr., Frangoudakis A., Papadakis G. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. Vol.15, iss. 8. P. 3963-3979. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.024>
5. Chen H., Goswami D.Y., Stefanakos E.K. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010. Vol. 14. P. 3059- 3067. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.006>
6. Li J., Pei G., Li Y., Wang D., Ji J. Energetic and exergetic investigation of an organic Rankine cycle at different heat source temperatures // Energy. 2012. Vol. 38, no. 1. С. 85-95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.12.032>
7. Kang S.H. Design and experimental study of ORC (organic Rankine cycle) and radial turbine using R245fa working fluid // Energy. 2012. Vol. 41. P.514-524.
8. Fernandez-Garcia A., Zarza E., Valenzuela L., Pérez M. Parabolic-trough solar collectors and their applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010. Vol.14. P.1695-1721. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.012>
9. Delgado-Torres A.M., Garcia-Rodriguez L. Analysis and optimization of the low-temperature solar organic Rankine cycle (ORC) // Energy Conversion and Management. 2010. Vol. 51. P. 2846-2856.
10. Rentizelas A., Karellas S., Kakaras E., Tatsiopoulos I. Comparative techno-economic analysis of ORC and gasification for bioenergy applications // Energy Conversion and Management. 2009. Vol. 50, no. 3. P. 674-681.
11. Куфтов А.Ф., Кузьмина Ю.С. Перспективы применения твердых топлив из биомассы // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 8. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/216747.html> (дата обращения 01.01.2014).
12. Огуречников Л.А. Геотермальные ресурсы в энергетике // Альтернативная энергетика и экология. 2005. № 11. С.58-66.
13. DiPippo R. Second Law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids // Geothermics. 2004. Vol. 33. P. 565-586.
14. Kanoglu M., Bolatturk A. Performance and parametric investigation of a binary geothermal power plant by exergy // Renewable Energy. 2008. Vol. 33. P. 2366-2374.
15. Yari M. Exergetic analysis of various types of geothermal power plants // Renewable Energy. 2010. Vol. 35. P.112-121.
16. Shengjun Z., Huaixin W., Tao G. Performance comparison and parametric optimization of subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation // Applied Energy. 2011. Vol. 88. P. 2740-2754.

17. Madloul N.A., Saidur R., Hossain M.S., Rahim N.A. A critical review on energy use and savings in the cement industries // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15. P. 2042-2060. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>
18. Yu G., Shu G., Tian H., Wei H., Liu L. Simulation and thermodynamic analysis of a bottoming Organic Rankine Cycle (ORC) of diesel engine (DE) // *Energy*. 2013. Vol. 51. P. 281-290. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.054>
19. Bombarda P., Invernizzi C.M., Pietra C. Heat recovery from Diesel engines: A thermodynamic comparison between Kalina and ORC cycles // *Applied Thermal Engineering*. 2010. Vol. 30. P. 212-219.
20. Srinivasan K.K, Mago P.J., Krishnan S.R. Analysis of exhaust waste heat recovery from a dual fuel low temperature combustion engine using an Organic Rankine Cycle // *Energy*. 2010. Vol. 35. P. 2387-2399. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.018>
21. Sprouse C., Depcik C. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery // *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 51. P. 711-722.
22. Invernizzi C., Iora P., Silva P. Bottoming micro-Rankine cycles for micro-gas turbines // *Applied Thermal Engineering*. 2007. Vol. 27. P.100-110.
23. Chacartegui R. et al. Alternative ORC bottoming cycles for combined cycle power plants // *Applied Energy*. 2009. Vol. 86. P. 2162-2170.
24. Saleh B., Koglbauer G., Wendland M., Fischer J. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles // *Energy*. 2007. Vol. 32. P. 1210-1221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2006.07.001>
25. Drescher U., Brüggemann D. Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants // *Applied Thermal Engineering*. 2007. Vol. 27. P. 223-228.
26. Tchanche B.F., Papadakis G., Lambrinos G., Frangoudakis A. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle // *Applied Thermal Engineering*. 2009. Vol. 29, no. 11-12. P. 2468-2476.
27. Mikielwicz D., Mikielwicz J. A thermodynamic criterion for selection of working fluid for subcritical and supercritical domestic micro CHP // *Applied Thermal Engineering*. 2010. Vol. 30. P. 2357-2362.
28. Lakew A.A., Bolland O. Working fluids for low-temperature heat source // *Applied Thermal Engineering*. 2010. Vol. 30. P. 1262-1268.
29. Stijepovic M.Z., Linke P., Papadopoulos A.I., Grujic A.S. On the role of working fluid properties in Organic Rankine Cycle performance // *Applied Thermal Engineering*. 2012. Vol. 36. P. 406-413.
30. Wang Z.Q., Zhou N.J., Guo J., Wang X.Y. Fluid selection and parametric optimization of organic Rankine cycle using low temperature waste heat // *Energy*. 2012. Vol. 40, iss. 1. P. 107-115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.022>

31. Roy J.P., Mishra M.K., Misra A. Performance analysis of an Organic Rankine Cycle with superheating under different heat source temperature conditions // *Applied Energy*. 2011. Vol. 88. P. 2995-3004.
32. Papadopoulos A.I., Stijepovic M.Z., Linke P. On the systematic design and selection of optimal working fluids for Organic Rankine Cycles // *Applied Thermal Engineering*. 2010. Vol. 30. P. 760-769.
33. Gao H., Liu C., He C., Xu X., Wu S., Li Y. Performance Analysis and Working Fluid Selection of a Supercritical Organic Rankine Cycle for Low Grade Waste Heat Recovery // *Energies*. 2012. Vol. 5. P. 3233-3247.
34. Colonna P., Rebay S., Harinck J., Guardone A. Real-gas effects in ORC turbine flow Simulations: influence of thermodynamic models on flow fields and performance parameters // *Proc. of European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECCOMAS CFD*. Egmond aan Zee, NL, 2006. P. 1-18.
35. Van der Stelt T.P., Nannan N.R., Colonna P. The iPRSV equation of state // *Fluid Phase Equilibria*. 2012. Vol. 330. P. 24-35.
36. Span R., Wagner W. Equations of State for Technical Applications. I. Simultaneously Optimized Functional Forms for Nonpolar and Polar Fluids // *International Journal of Thermophysics*. 2003. Vol. 24, no.1. P. 1-39.
37. Quoilin S., Aumann R., Grill A., Schuster A., Lemort V., Spliethoff H. Dynamic modeling and optimal control strategy of waste heat recovery Organic Rankine Cycles // *Applied Energy*. 2011. Vol. 88. P. 2183-2190.
38. Ho T., Mao S.S., Greif R. Comparison of the Organic Flash Cycle (OFC) to other advanced vapor cycles for intermediate and high temperature waste heat reclamation and solar thermal energy // *Energy*. 2012. Vol. 42. P. 213-223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.067>
39. Ho T., Mao S.S., Greif R. Increased power production through enhancements to the Organic Flash Cycle (OFC) // *Energy*. 2012. Vol. 45. P. 686-695. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.023>

Organic Rankine Cycle and its application in renewable power engineering

02, February 2014

DOI: **10.7463/0114.0699165**

G.V. Belov, M.A. Dorokhova

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

gbelov@yandex.rumadorox@mail.ru

A considerable part of energy consumed in the world is thermal power that is produced due to burning of hydrocarbon fuels and as a result of controlled course of nuclear reactions. Thus rather large part of thermal power is used ultrinefficiently, often simply dissipates in environment. The rise in prices for energy compels to use low-grade one to be released in large quantities in environment. To utilize the low-grade energy Renkin's cycle with with alternative working bodies is often applied. The corresponding cycle was called Renkin's organic cycle (ROC). A substance with lower boiling temperature, than that of water is used in ROC as a working body to utilize low-grade energy.

The review of literature shows that thrust on power sector related to utilization of residual heat (thermal waste) and use of alternative energy sources, recently, intensively develops. However there is, essentially, a lack of publications on this subject in Russian. The objective of given article is to analyse modern sources of information (mainly, foreign ones) which consider various aspects of ROC and its application potential in alternative power engineering. The article focuses much attention on the choice of ROC working body. It presents a list of main requirements for a working body. The article studies the matters of ROC simulation.

It is shown that ROC application enables using the low-grade power of exhaust gases, geothermal sources, other thermal streams with rather low temperature. Integration of ROC with ICE (internal combustion engine) is in position to increase an efficiency of used fuel energy and to reduce amount of toxic impurity in exhaust gases. Essential influence of working body properties on its characteristics of ROC is noted.

Publications with keywords: [organic Rankine cycle](#), [alternative power engineering](#)

Publications with words: [organic Rankine cycle](#), [alternative power engineering](#)

References

1. Velez F., Segovia J.J., Martin M.C., Antolin G., Chejne F., Quijano A. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, no. 6, pp. 4175- 4189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.022>
2. Quoilin S., Van Den Broekb M., Declayea S., Dewallefa P., Lemorta V. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 22, pp.168-186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028>
3. Yanchoshek L., Kunts P. [Organic Rankine Cycle: application in cogeneration power plant]. *Turbiny i dizeli -Turbines & Diesels*, 2012, no. 2, pp. 50-53.
4. Tchanche B.F., Lambrinos Gr., Frangoudakis A., Papadakis G. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol.15, iss. 8, pp. 3963-3979. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.024>
5. Chen H., Goswami D.Y., Stefanakos E.K. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, vol. 14, pp. 3059- 3067. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.006>
6. Li J., Pei G., Li Y., Wang D., Ji J. Energetic and exergetic investigation of an organic Rankine cycle at different heat source temperatures. *Energy*, 2012, vol. 38, no. 1, pp. 85-95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.12.032>
7. Kang S.H. Design and experimental study of ORC (organic Rankine cycle) and radial turbine using R245fa working fluid. *Energy*, 2012, vol. 41, pp.514-524.
8. Fernandez-Garcia A., Zarza E., Valenzuela L., Pérez M. Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, vol.14, pp.1695-1721. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.012>
9. Delgado-Torres A.M., Garcia-Rodriguez L. Analysis and optimization of the low-temperature solar organic Rankine cycle (ORC). *Energy Conversion and Management*, 2010, vol. 51, pp. 2846-2856.
10. Rentizelas A., Karellas S., Kakaras E., Tatsiopoulou I. Comparative techno-economic analysis of ORC and gasification for bioenergy applications. *Energy Conversion and Management*, 2009, vol. 50, no. 3, pp. 674-681.
11. Kuftov A.F., Kuz'mina Yu.S. [Prospects for Using Solid Fuel from Biomass]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana - Science and Education of the Bauman MSTU*, 2011, no. 8. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/216747.html> , accessed 01.01.2014.

12. Ogurechnikov L.A. [Geothermal resources in power engineering]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya - Alternative Energy and Ecology*, 2005, no. 11, pp. 58-66.
13. DiPippo R. Second Law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids. *Geothermics*, 2004, vol. 33, pp. 565-586.
14. Kanoglu M., Bolatturk A. Performance and parametric investigation of a binary geothermal power plant by exergy. *Renewable Energy*, 2008, vol. 33, pp. 2366-2374.
15. Yari M. Exergetic analysis of various types of geothermal power plants. *Renewable Energy*, 2010, vol. 35, pp.112-121.
16. Shengjun Z., Huaixin W., Tao G. Performance comparison and parametric optimization of subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, pp. 2740-2754.
17. Madloul N.A., Saidur R., Hossain M.S., Rahim N.A. A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, pp. 2042-2060. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>
18. Yu G., Shu G., Tian H., Wei H., Liu L. Simulation and thermodynamic analysis of a bottoming Organic Rankine Cycle (ORC) of diesel engine (DE). *Energy*, 2013, vol. 51, pp. 281-290. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.054>
19. Bombarda P., Invernizzi C.M., Pietra C. Heat recovery from Diesel engines: A thermodynamic comparison between Kalina and ORC cycles. *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 30, pp. 212-219.
20. Srinivasan K.K, Mago P.J., Krishnan S.R. Analysis of exhaust waste heat recovery from a dual fuel low temperature combustion engine using an Organic Rankine Cycle. *Energy*, 2010, vol. 35, pp. 2387-2399. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.018>
21. Sprouse C., Depcik C. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 51, pp. 711-722.
22. Invernizzi C., Iora P., Silva P. Bottoming micro-Rankine cycles for micro-gas turbines. *Applied Thermal Engineering*, 2007, vol. 27, pp.100-110.
23. Chacartegui R. et al. Alternative ORC bottoming cycles for combined cycle power plants. *Applied Energy*, 2009, vol. 86, pp. 2162-2170.
24. Saleh B., Koglbauer G., Wendland M., Fischer J. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles. *Energy*, 2007, vol. 32, pp. 1210-1221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2006.07.001>
25. Drescher U., Brüggemann D. Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants. *Applied Thermal Engineering*, 2007, vol. 27, pp. 223-228.
26. Tchanche B.F., Papadakis G., Lambrinos G., Frangoudakis A. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineerin*, 2009, vol. 29, no. 11-12, pp. 2468-2476.

27. Mikielewicz D., Mikielewicz J. A thermodynamic criterion for selection of working fluid for subcritical and supercritical domestic micro CHP. *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 30, pp. 2357-2362.
28. Lakew A.A., Bolland O. Working fluids for low-temperature heat source. *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 30, pp. 1262-1268.
29. Stijepovic M.Z., Linke P., Papadopoulos A.I., Grujic A.S. On the role of working fluid properties in Organic Rankine Cycle performance. *Applied Thermal Engineering*, 2012, vol. 36, pp. 406-413.
30. Wang Z.Q., Zhou N.J., Guo J., Wang X.Y. Fluid selection and parametric optimization of organic Rankine cycle using low temperature waste heat. *Energy*, 2012, vol. 40, iss. 1, pp. 107-115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.022>
31. Roy J.P., Mishra M.K., Misra A. Performance analysis of an Organic Rankine Cycle with superheating under different heat source temperature conditions. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, pp. 2995-3004.
32. Papadopoulos A.I., Stijepovic M.Z., Linke P. On the systematic design and selection of optimal working fluids for Organic Rankine Cycles. *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 30, pp. 760-769.
33. Gao H., Liu C., He C., Xu X., Wu S., Li Y. Performance Analysis and Working Fluid Selection of a Supercritical Organic Rankine Cycle for Low Grade Waste Heat Recovery. *Energies*, 2012, vol. 5, pp. 3233-3247.
34. Colonna P., Rebay S., Harinck J., Guardone A. Real-gas effects in ORC turbine flow Simulations: influence of thermodynamic models on flow fields and performance parameters. *Proc. of European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECCOMAS CFD*. Egmond aan Zee, NL, 2006, pp. 1-18.
35. Van der Stelt T.P., Nannan N.R., Colonna P. The iPRSV equation of state. *Fluid Phase Equilibria*, 2012, vol. 330, pp. 24-35.
36. Span R., Wagner W. Equations of State for Technical Applications. I. Simultaneously Optimized Functional Forms for Nonpolar and Polar Fluids. *International Journal of Thermophysics*, 2003, vol. 24, no.1, pp. 1-39.
37. Quoilin S., Aumann R., Grill A., Schuster A., Lemort V., Spliethoff H. Dynamic modeling and optimal control strategy of waste heat recovery Organic Rankine Cycles. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, pp. 2183-2190.
38. Ho T., Mao S.S., Greif R. Comparison of the Organic Flash Cycle (OFC) to other advanced vapor cycles for intermediate and high temperature waste heat reclamation and solar thermal energy. *Energy*, 2012, vol. 42, pp. 213-223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.067>
39. Ho T., Mao S.S., Greif R. Increased power production through enhancements to the Organic Flash Cycle (OFC). *Energy*, 2012, vol. 45, pp. 686-695. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.023>