

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРИГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК НА ОРГАНИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ РЕНКИНА

А. Е. Шуст

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель А. В. Овсянник

Одной из приоритетных задач энергосбережения является эффективное и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов. Повышение термодинамической эффективности генерации энергии различных видов необходимо рассматривать как один из возможных путей решения этой задачи.

Для утилизации тепловых отходов продуктов сгорания газотурбинных установок, топлива с низкой теплотворной способностью, а также для утилизации вторичных энергетических ресурсов, которые в больших количествах присутствуют на промышленных предприятиях, находят свое применение тригенерационные турбоустановки на органическом цикле Ренкина (ОЦР). Одной из таких установок является тригенерационная турбоустановка с производством жидкой и газообразной углекислой кислоты.

Продукты сгорания поступают в установку абсорбер–дессорбер, где получается чистый  $\text{CO}_2$ . Полученная углекислая кислота при помощи инжектора подается в ресивер. Из ресивера сжатый в компрессоре диоксид углерода подается в теплообменник, охлаждается, дросселируется в регулирующем вентиле и сепарируется в сепараторе. Часть полученной жидкой кислоты подается на склад. Вторая часть поступает на вторую ступень дросселирования и сепарируется. Часть полученной жидкой кислоты используется для получения холода и конденсации рабочего тела в конденсаторе турбоустановки на органическом цикле Ренкина. Получение холода в установке (тригенерация энергии) осуществляется в испарителях. Это приводит к повышению энергетической эффективности установки.

Можно предположить, что если вместо охлаждения в конденсаторе жидкой углекислотой использовать сторонний источник, например, в виде контура охлаждения с градирней, либо холодной воды, поступающей на объект из поверхностных или подземных источников, то можно значительно снизить расходы углекислоты, а как следствие – и потери эксергии в цикле.

Эксергетический анализ показал, что применение внешнего источника охлаждения конденсатора установки позволяет снизить затраты электрической энергии на привод компрессора до 2,97 %.

В качестве внешнего источника охлаждения предложено использовать либо систему оборотного водоснабжения с градирней либо холодную воду, поступающую на объект из поверхностных или подземных источников.

Все более широкое применение в малой энергетике находят схемы на ОЦР, в котором в качестве рабочих тел 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. Наиболее перспективными областями применения ОЦР-установок служат солнечная и геотермальная энергетика, утилизация тепловых отходов, продуктов сгорания газотурбинных установок, утилизация вторичных энергетических ресурсов, которые в больших количествах присутствуют на промышленных предприятиях, а также сжигание топлива с низкой теплотворной способностью (щепа, биогаз, мусор и т. д.).

Применение ОЦР обусловлено следующими его достоинствами: довольно низкие допустимые температуры низкокипящего рабочего тела (НКРТ) перед турбиной, простота конструкции ОЦР-установок, низкая стоимость, высокая надежность, простота автоматизации, невысокая скорость вращения турбины и т. д. Установки такого типа могут применяться не только в рамках когенерации, но и в тригенерационных схемах для производства электричества, тепла и холода, а источником энергии в них могут служить высокотемпературные вторичные энергетические ресурсы (ВЭР).

Принцип работы схемы следующий: из конденсатора жидкое рабочее тело насосом подается в теплообменник, где нагревается парами НКРТ, поступающими из турбины. Затем рабочее тело направляется в котел-утилизатор, где нагревается, парообразуется и перегревается.

Далее рабочее тело поступает в турбину, где совершает механическую работу по вращению вала турбины, связанного муфтой с генератором электрического тока. Затем НКРТ охлаждается в теплообменнике и поступает в конденсатор, где и конденсируется.

Установлено влияние теплофизических свойств (критического давления и удельной теплоты конденсации) на эффективность рабочего тела в сверхкритическом органическом цикле Ренкина. Так, с увеличением критического давления рабочего тела эффективность ОЦР при термодинамически оптимальных параметрах снижается, а с увеличением удельной теплоты конденсации – растет. Сравнивая низкокипящие рабочие тела по их теплофизическим свойствам (критической температуре, критическому давлению и удельной теплоте конденсации), можно определять рабочие тела, обладающие наиболее высокой термодинамической эффективностью для применения в ОЦР.

Органический цикл Ренкина является альтернативой классическому паротурбинному циклу. Его применение предпочтительнее (с технико-экономической точки зрения) при температурах рабочего тела перед турбиной 250 °С и ниже [1], [2]. Это обусловлено снижением эффективности паротурбинного цикла при столь низких значениях температуры рабочего тела, сложностью конструкции и, как следствие, более высокой стоимостью установки. Так, установка на ОЦР (с учетом всех сопутствующих расходов на монтаж, проектирование и т. д.) обойдется в 800–900 долл./кВт, тогда как стоимость паротурбинной установки соизмеримой мощности – от 1000 долл./кВт. Проведенные исследования для схем на органическом цикле Ренкина показали, что в ОЦР также существуют свои оптимальные параметры рабочего тела перед турбиной (температура и давление), при которых эксергетический КПД достигает максимального значения. Аналогичные результаты характерны и для ОЦР с промежуточным перегревом рабочего тела

Таким образом, целью исследования является изучение влияния промежуточного перегрева на эксергетическую эффективность технических условий на ОЦР для различных НКРТ при термодинамически оптимальных параметрах.

Принцип работы: из конденсатора жидкое низкокипящее рабочее тело насосом подается в теплообменный аппарат, где нагревается парами НКРТ, поступающими из турбины. Затем рабочее тело направляется в котел-утилизатор, где нагревается, испаряется и перегревается. Далее поступает в турбину, где совершает механическую работу вращения вала, связанного муфтой с генератором электрического тока. В схеме с промежуточным перегревом НКРТ, пройдя часть высокого давления (ЧВД) турбины, снова попадает в котел-утилизатор, где повторно перегревается и поступает в часть низкого давления (ЧНД) турбины. После совершения работы в турбине НКРТ,

будучи еще в перегретом состоянии, охлаждается до температуры, близкой к температуре насыщения при данном давлении в теплообменном аппарате, и направляется в конденсатор, где и конденсируется.

Классификация рабочих тел по стоимости: с низкой (Н) стоимостью – не более 5 бел. руб./л, средней (С) – 5–15 бел. руб./л, высокой (В) – более 15 бел. руб./л. При этом средний расход хладагента на выработку 1 кВт · ч электроэнергии в ОЦР значительно (примерно в 10 раз) превосходит аналогичный расход водяного пара в классическом цикле Ренкина и зависит от теплофизических свойств НКРТ. Таким образом, при выборе рабочего тела необходимо обращать внимание не только на его эффективность, но и на стоимость.

Анализ полученных результатов показывает, что использование промежуточного перегрева в ОЦР приводит к повышению эксергетической эффективности цикла. В среднем прирост эксергетического КПД составляет 4,28 %, а для некоторых рабочих тел значительно превосходит данный результат (например, 8,14 и 6,56 % для R717 и R32, соответственно), что обусловлено их теплофизическими свойствами.

### **ПРИМЕНЕНИЕ ЗАМКНУТЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ СИСТЕМ В ИННОВАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ТРАНСФОРМАЦИИ ТЕПЛА**

**Д. А. Бекаревич, Е. В. Соловей, Н. М. Кидун**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель А. В. Шаповалов

**Трансформация тепла.** Под термином «трансформация теплоты» понимается процесс снижения и/или повышения температуры исходной теплоты в комплексах, состоящих из тепловых машин, работающих в режиме прямого и обратного термодинамических циклов. Различают три системы трансформации теплоты: холодильная машина, понижающий и повышающий термотрансформаторы.

**Замкнутые двухфазные теплопередающие системы.** Двухфазное теплопередающее устройство представлено в виде замкнутого герметичного контура, частично заполненного теплоносителем, включающее соединенный паропроводом и конденсаторопроводом испаритель и расположенный над ним змеевиковый конденсатор; при этом испаритель также выполнен в виде змеевика, а в конденсаторопроводе на входе в испаритель установлен гидравлический затвор, представленный в виде сопла либо пористой структуры. При этом гидравлическое сопротивление затвора больше или равно суммарному гидравлическому сопротивлению испарителя, паропровода и конденсатора. Это придает циркуляции теплоносителя однонаправленное движение и снижает пульсации в контуре циркуляции, характерные для такого рода двухфазных теплопередающих устройств.

Предлагаемая конструкция устройства позволяет собирать тепло от рассредоточенных в пространстве или на поверхности источников тепловыделения с небольшой плотностью теплового потока, накапливая на выходе из испарителя требуемую величину теплового потока, необходимую для быстрого запуска устройства в нестационарных условиях, позволяет пространственно разделять источник и сток тепла, что, вместе с отсутствием движущихся деталей в системе охлаждения, создает положительный эффект, обусловленный увеличением термодинамической эффективности при повышении эксплуатационной надежности всего устройства в целом.