

Исследования показали, что термические сопротивления и средние температуры стенки отличаются между классическим и пародинамическим термосифонами. Для классического термосифона характерны более высокие значения термических сопротивлений и температур стенки. Это обусловлено тем, что коэффициенты теплопередачи в кольцевом зазоре испарителя и конденсатора пародинамического термосифона выше, чем в свободном объеме испарителя и конденсатора классического термосифона.

#### Л и т е р а т у р а

1. Патент ВУ 11072, F 28 D 15/00. Термосифон : заявлено 20.11.2015 ; опубл. 01.03.2016 / Родин А. В., Шаповалов А. В.

УДК 620.9

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТУРБОУСТАНОВОК НА ОРГАНИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ РЕНКИНА

Д. Г. Шутов

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

*Рассмотрено применение органического цикла Ренкина в альтернативной энергетике, для утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов, а также при сжигании топлив с низкой теплотворной способностью.*

**Ключевые слова:** органический цикл Ренкина, низкокипящее рабочее тело, эксергетический анализ, повышение эффективности, хладагент

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF TURBO-INSTALLATIONS ON THE RENKIN ORGANIC CYCLE

D. G. Shutov

*Sukhoi State Technical University of Gomel, Republic of Belarus*

Scientific supervisor A. V. Ovsyannik

*This article discusses the application of the organic Rankine cycle in alternative energy, for the utilization of low-potential secondary energy resources, as well as for the combustion of fuels with low calorific value.*

**Keywords:** organic Rankine cycle, low-boiling working fluid, exergy analysis, efficiency improvement, refrigerant.

Органический цикл Ренкина (ОЦР) является альтернативой классическому паротурбинному циклу. Применение ОЦР предпочтительнее с техникоэкономической точки зрения при температурах рабочего тела перед турбиной 250 °C и ниже. Это обусловлено снижением эффективности паротурбинного цикла при столь низких значениях температуры рабочего тела, более высокой стоимостью установки в связи с сложностью конструкции. Поэтому ОЦР приобретает все более широкое распространение в альтернативной энергетике для утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов.

Для анализа метода повышения эффективности турбоустановок (ТУ) на органическом цикле Ренкина рассмотрим два характерных цикла ТУ на ОРЦ: на перегретом паре (рис. 1) и с промежуточным перегревом рабочего тела (рис. 2).

Принцип работы исследуемой схемы: из конденсатора жидкое низкокипящее рабочее тело насосом подается в теплообменный аппарат, где нагревается парами низкокипящих рабочих тел (НКРТ), поступающими из турбины. Затем рабочее тело направляется в котел-utiлизатор, 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-utiлизатор, 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 приданном давлении в теплообменном аппарате, и направляется в конденсатор, где и конденсируется.

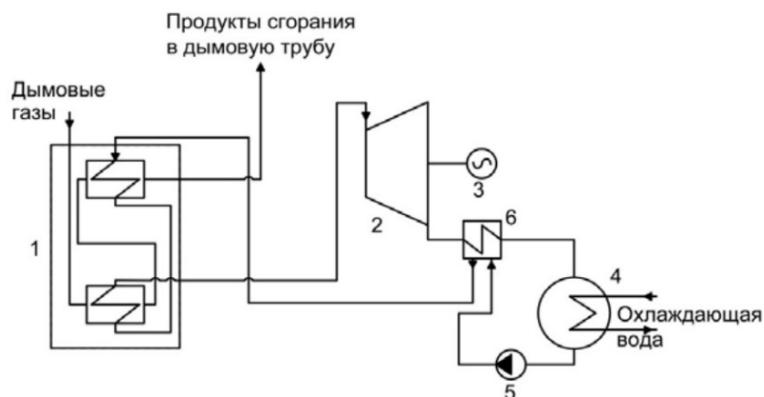


Рис. 1. Схема органического цикла Ренкина на перегретом паре:  
1 – котел-utiлизатор; 2 – турбина; 3 – генератор;  
4 – конденсатор; 5 – насос; 6 – теплообменный аппарат

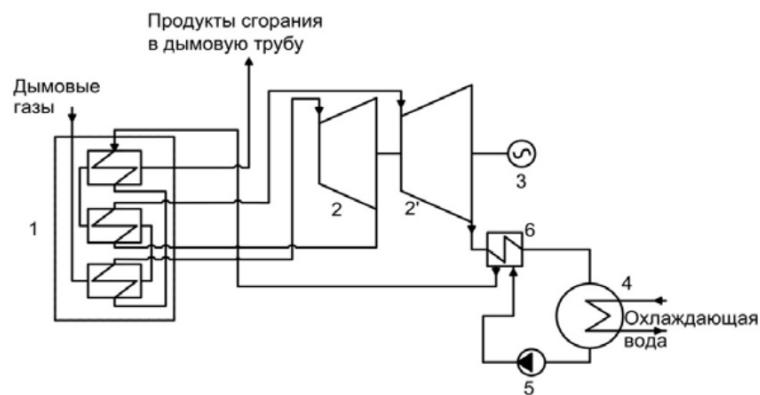


Рис. 2. Схема органического цикла Ренкина с промежуточным перегревом рабочего тела:  
1 – котел-utiлизатор; 2 – часть высокого давления турбины;  
2' – часть низкого давления турбины; 3 – генератор;  
4 – конденсатор; 5 – насос; 6 – теплообменный аппарат

Наиболее подходящим методом термодинамического анализа ОЦР является эксергетический, позволяющий изучать качественную сторону преобразования энергии и степень термодинамического совершенства процессов.

Циклы исследуемых схем с оптимальными параметрами НКРТ представлены на рис. 3, 4. В качестве рабочего тела использован один из наиболее эффективных хладагентов – R245fa, обладающий нулевым потенциалом разрушения озонового слоя и низким потенциалом глобального потепления.

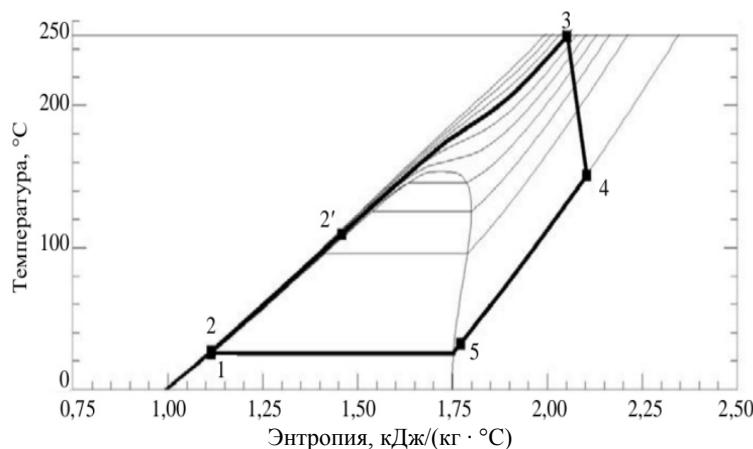


Рис. 3. Органический цикл Ренкина на перегретом паре  
в  $T$ - $s$ -координатах

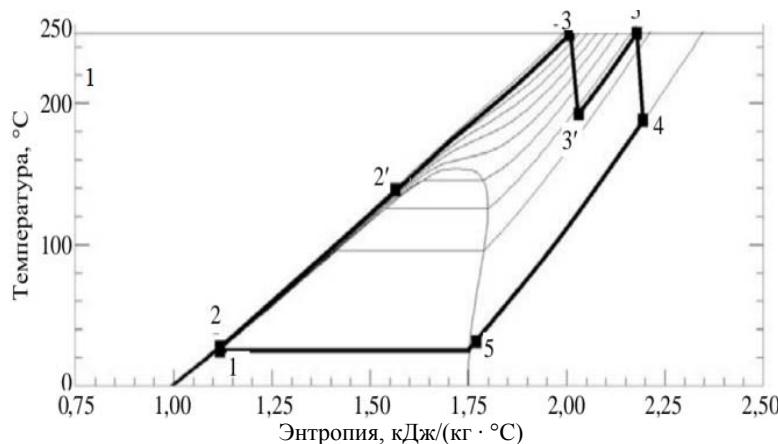


Рис. 4. Органический цикл Ренкина с промежуточным  
перегревом в  $T$ - $s$ -координатах

Циклы состоят из следующих процессов: 1–2 – повышение давления НКРТ в насосе; 2–2' – нагрев НКРТ в теплообменном аппарате; 2'–3 – нагрев, парообразование и перегрев в котле-utiлизаторе; 3–4 – расширение НКРТ в турбине; 3–3' – расширение в ЧВД турбины; 3'–3'' – перегрев НКРТ в промежуточном перегревателе котла-utiлизатора; 3''–4 – расширение НКРТ в ЧНД турбины; 4–5 – охлаждение паров хладагента в теплообменнике; 5–1 – охлаждение и конденсация паров хладагента в конденсаторе.

Полученные результаты показали, что использование промежуточного перегрева в ОЦР приводит к повышению эксергетической эффективности цикла. В среднем прирост эксергетического КПД составляет 4,28 % на примере хладагента R245fa.

Промежуточный перегрев при термодинамически оптимальных параметрах рабочего тела перед ЧВД и ЧНД приводит к снижению потерь эксергии в котле-утилизаторе, значительному увеличению регенерации в теплообменном аппарате, росту потерь эксергии в насосе (по причине повышения давления рабочего тела перед турбиной), их перераспределению в турбоагрегате, теплообменном аппарате и конденсаторе (росту потерь эксергии в турбоагрегате и теплообменном аппарате в результате увеличения количества эксергии, поступающей и преобразовываемой в данных аппаратах, снижению потерь эксергии в конденсаторе из-за уменьшения количества рабочего тела, циркулирующего в цикле и, как следствие, поступающего в конденсатор).

Таким образом, применение органического цикла Ренкина актуально в альтернативной энергетике для утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов, а также при сжигании топлив с низкой теплотворной способностью. Для повышения термодинамической эффективности турбоустановок на органическом цикле Ренкина целесообразно применение промежуточного перегрева. Максимальная эффективность достигается при использовании оптимальных с термодинамической точки зрения параметров рабочего тела перед частями высокого и низкого давления турбины.

#### Л и т е р а т у р а

1. Овсянник, А. В. Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – № 3 (65). – С. 263–275.
2. Овсянник, А. В. Выбор, расчет и термодинамический анализ турбоустановок на органическом цикле Ренкина А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – № 1 (65). – С. 76–88.
3. Ключинский, В. П. Термодинамический и технико-экономический анализ тригенерационных установок на органическом цикле Ренкина / В. П. Ключинский, А. В. Овсянник // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2022. – № 1 (88). – С. 80–89.