

- нерному бизнесу региона : материалы Всерос. науч.-практ. конф. памяти проф. А. Н. Шичкова. – Вологда, 2024. – С. 99–102.
7. Использование торфа в качестве сорбента нефти и нефтепродуктов с дальнейшей утилизацией отработанного материала в качестве топлива / Э. Р. Зверева, Е. С. Дремичева, А. А. Эминов, Е. Н. Макеева, Т. Н. Никулина // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2023. – № 3 (94). – С. 44–57.

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 использование органического цикла Ренкина в альтернативной энергетике, подчеркивая его возможности по утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов и сжиганию топлива с низкой теплотворной способностью. Обращено внимание на роль промежуточного перегрева в повышении термодинамической эффективности турбоустановок. Для достижения наилучших результатов рекомендовано применение оптимальных термодинамических параметров рабочего тела, что особенно важно для участков высокой и низкой давления турбины.

Ключевые слова: органический цикл Ренкина, низкикипящее рабочее тело, эксергетический анализ, повышение эффективности, хладагент.

Органический цикл Ренкина (ОЦР) является альтернативой классическому паротурбинному циклу. Его применение предпочтительнее (с техникоэкономической точки зрения) при температурах рабочего тела перед турбиной 250 °С и ниже. Это обусловлено снижением эффективности паротурбинного цикла при столь низких значениях температуры рабочего тела, сложностью конструкции и, как следствие, более высокой стоимостью установки. Поэтому ОЦР приобретает все более широкое распространение в альтернативной энергетике для утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов, а также при сжигании топлив с низкой теплотворной способностью.

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 следующий: из конденсатора жидкое низкикипящее 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.

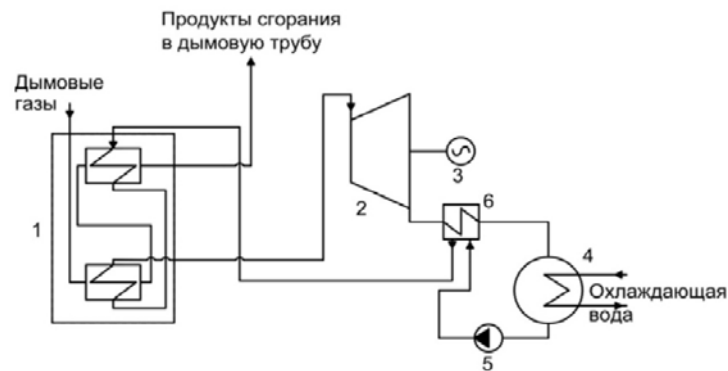


Рис. 1. Схема органического цикла Ренкина на перегретом паре:
1 – котел-утилизатор; 2 – турбина; 3 – генератор; 4 – конденсатор;
5 – насос; 6 – теплообменный аппарат

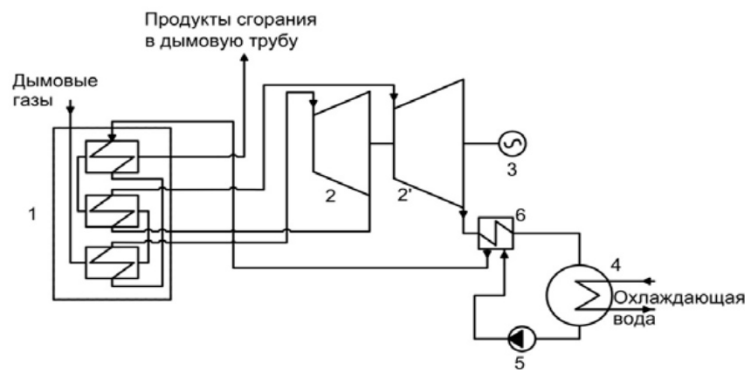


Рис. 2. Схема органического цикла Ренкина
с промежуточным перегревом рабочего тела:
1 – котел-утилизатор; 2 – часть высокого давления турбины;
2' – часть низкого давления турбины; 3 – генератор;
4 – конденсатор; 5 – насос; 6 – теплообменный аппарат

Теоретические исследования. 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.

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-утилизаторе; 3–4 – расширение НКРТ в турбине; 3–3' – расширение в ЧВД турбины; 3'–3'' – перегрев НКРТ в промежуточном перегревателе котла-утилизатора; 3''–4 – расширение НКРТ в ЧНД турбины; 4–5 – охлаждение паров хладагента в теплообменнике; 5–1 – охлаждение и конденсация паров хладагента в конденсаторе.

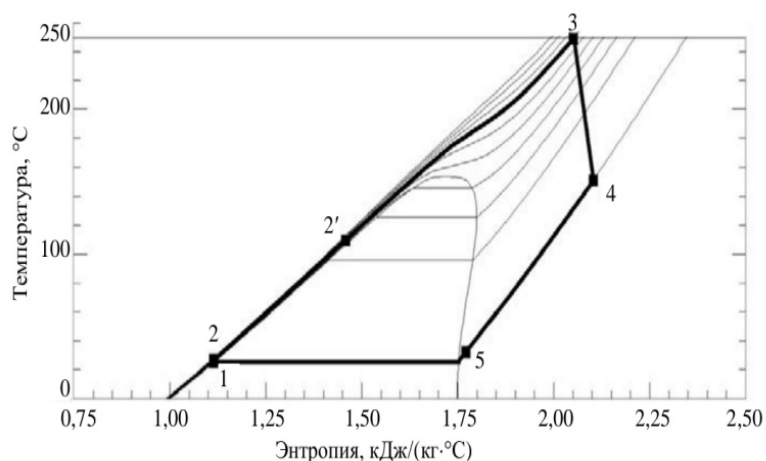


Рис. 3. Эрганический цикл Ренкина на перегретом паре в T - s -координатах

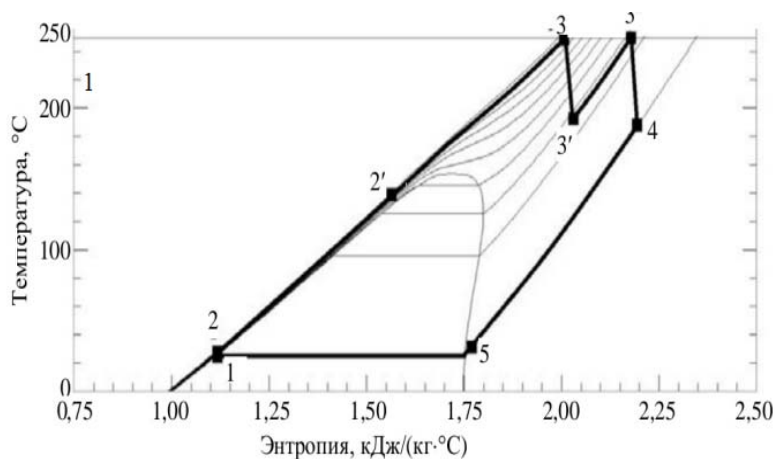


Рис. 4. Эрганический цикл Ренкина с промежуточным перегревом в T - s -координатах

Анализ результатов. 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 (вследствие 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 энергетиче-

ских 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.

Литература

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. – Т. 65, № 3. – 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.
4. 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.

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ФРЕОНА R404a НА ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

П. С. Колмачева

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

Проведены теоретические и экспериментальные исследования теплообмена при конденсации пара и гравитационном ламинарном течении пленки конденсата на вертикальной поверхности. Проверка полученных экспериментальных результатов, рассчитанных по найденным зависимостям, осуществлена расчетным путем по формулам Нуссельта с помощью сравнения представленных результатов с экспериментальными исследованиями процесса конденсации озонобезопасного фреона R404a на наклонных поверхностях с вертикальными и относительно вертикальными ребрами.

Ключевые слова: конденсация, хладагент, теплообмен, фреон, эксперимент, коэффициент теплоотдачи.

Конденсация пара рабочих тел на практике встречается практически во всех теплоэнергетических установках, работающих как по прямому, так и по обратному циклам, и происходит в конденсаторах паросиловых установок, холодильных и в многочисленных теплообменных аппаратах (парожидкостные подогреватели). В подавляющем большинстве случаев конденсация в таких устройствах протекает на охлаждаемых поверхностях теплообмена, и выделенная при фазовом переходе теплота связана теплообменом через охлаждаемую поверхность с нагреваемой средой.

Эксперимент. Проводились экспериментальные исследования процесса конденсации паров смесового чистого озонобезопасного хладагента R404a на продольно-оребренной трубе с ребром трапецевидного профиля высотой 25 мм (рис. 1).