
УДК 620.9

М.А. ЕРЁМЕНКО, А.А. СТРЕЖИК, студенты гр. 10604117 (БНТУ)

Научный руководитель – С.А. Качан, к.т.н., доцент (БНТУ)
г. Минск

ЦИКЛ КАЛИНЫ И ЕГО ОСОБЕННОСТИ

Поскольку спрос на энергию растет день ото дня, электроэнергетика играет важную роль в экономическом росте любой страны. Интенсивное использование ископаемого топлива не только приводит к более быстрому сокращению традиционных энергетических ресурсов, но также ведет к ухудшению состояния окружающей среды.

При этом актуальным является поиск наиболее эффективных решений для выработки энергии за счет использования низкотемпературных источников тепла, таких как выхлоп газовой турбины, тепло от двигателей внутреннего сгорания, отходящее тепло промышленных процессов, а также за счет возобновляемых источников энергии: солнечной тепловой, геотермальной, энергии биомассы и др.

Для утилизации тепла от источников с низким уровнем тепла цикл Ренкина использует органические рабочие жидкости с низкой температурой кипения.

В начале 1980-х годов Александр Иванович Калина предложил новое семейство термодинамических энергетических циклов, использующих смесь разных жидкостей – в первую очередь аммиака и воды – в качестве рабочего тела, и такая конфигурация цикла была названа циклом Калины [1, 2].

Использование бинарной смеси аммиака и воды в качестве рабочего тела имеет благоприятные характеристики для производства электроэнергии из низкотемпературных источников тепла.

Одним из недостатков цикла Ренкина, применяемого в низкотемпературном, «нижнем», подстраиваемом цикле – это постоянная температура фазового перехода (парообразования).

В цикле Калины используется смешанная рабочая жидкость изменяющегося состава для обеспечения лучшего согласования между температурами горячего и холодного потоков. Состав жидкости меняется в цикле в разных точках. Аммиак в смеси начинает испаряться первым, и по мере выкипания его концентрация уменьшается, а температура кипения смеси увеличивается. Это уменьшает несоответствие температур между используемым отходящим теплом и жидкостью в теплообменнике-парогенераторе и позволяет повысить эффективность «нижнего» цикла.

Диаграмма использования тепла в цикле Ренкина (рисунок 1,а) по сравнению с циклом Калины (рисунок 1,б) показывает преимущество последнего [1]. Изменяющаяся температура во время процессов теплопередачи снижает термодинамическую необратимость теплообмена.

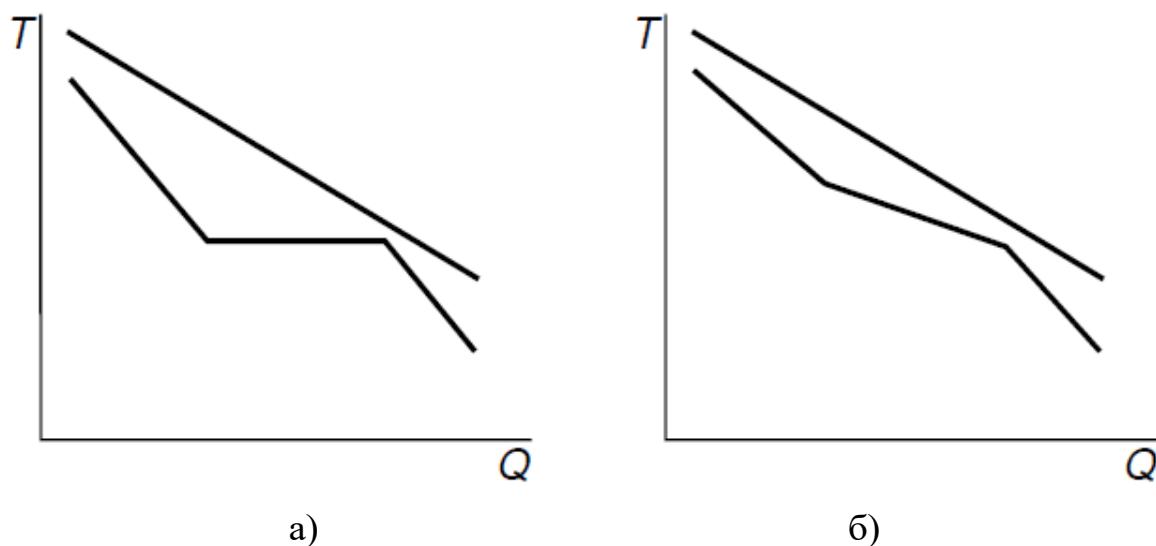


Рисунок 1. Диаграмма утилизации тепла: (а) цикл Ренкина и (б) цикл Калины

Базовый цикл Калины состоит из парогенератора с рекуперацией тепла (котла-utiлизатора), пароаммиачной турбины и подсистемы конденсации-дистилляции, состоящей из рекуператора, абсорбера, сепаратора и конденсатора, как показано на рисунке 2 [1].

При конденсации-дистилляции, поток рабочей жидкости от турбины охлаждается в рекуператоре, а затем смешивается с обедненным раствором аммиака для повышения температуры конденсации. Полученный базовый раствор конденсируется в абсорбере и под давлением подается в рекуператор. Часть потока направляется на разбавление богатого аммиаком потока, выходящего из сепаратора. Основной поток проходит через рекуператор и мгновенно попадает в сепаратор. Пар смешивается с основным раствором, конденсируется и сжимается перед поступлением в парогенератор.

Цикл Калины имеет на одну степень свободы больше, чем цикл Ренкина, – это процентный состав смеси аммиака и воды, который будет значительно влиять на термодинамическую эффективность цикла Калины.

Проектные исследования цикла Калины для геотермальных ресурсов с низкой и умеренной температурой указывают на различный состав смесей аммиак-вода, обычно около 70 мас.% аммиака. Введенная в эксплуатацию в 2000 году геотермальная электростанция на базе цикла Калина в Ху-

савике, Исландия, с установленной мощностью 2 МВт имеет концентрацию рабочего тела 82 мас.% аммиака [2]. Когда цикл Калины согласован с циклом Ренкина с образованием комбинированного цикла, оптимальная доля водно-аммиачной смеси составляет 89 мас.% [2].

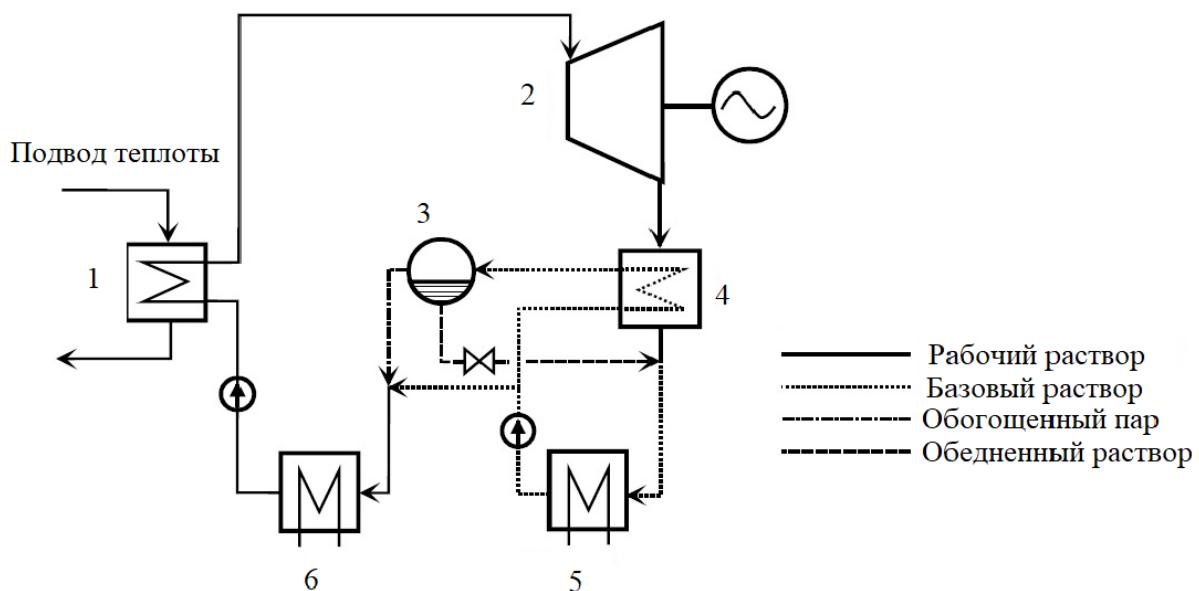


Рисунок 2. Принципиальная схема цикла Калины [1]: 1 – парогенератор с рекуперацией тепла; 2 – пароаммиачная турбина; 3 – сепаратор; 4 – рекуператор; 5 – абсорбер; 6 – конденсатор.

Отметим преимущества рабочего тела – смеси аммиака и воды.

1. Использование более легкого компонента (аммиака) позволяет эффективно использовать поток отходящего тепла при более высоком давлении, вызывая начало кипения при более низкой температуре.

2. Использование смеси позволяет изменять состав за счет использования дистилляции, что приводит к более богатому составу для котла и более бедному составу в конденсаторе при низком давлении.

3. Из-за сходной молекулярной массы аммиака и воды (17,03 и 18,015 соответственно) пар воды и аммиака ведет себя практически так же, как водяной пар, что позволяет использовать стандартные компоненты паровой турбины.

4. Можно использовать традиционные материалы: углеродистая сталь и стандартные жаропрочные сплавы подходят для работы с аммиаком; запрещено только использование меди и медных сплавов. Однако не рекомендуется использовать водно-аммиачную смесь при температурах выше 400°C, потому что аммиак становится нестабильным,

что приводит к нитридной коррозии.

5. Аммиак легко доступен и относительно дешев.

6. Аммиак не опасен для экологии, так как не приводит к выбросам в окружающую среду или глобальному потеплению. Аммиак помогает атмосфере, нейтрализуя кислотные загрязнения в воздухе [2].

7. Существуют проверенные протоколы безопасности при хранении и использовании аммиака на промышленных предприятиях. Для сравнения: ранее преобладавшие в таком применении углеводороды легко воспламеняются и могут представлять угрозу взрыва. Органические жидкости могут представлять угрозу для местных экосистем в случае аварийного разлива. При этом вероятность возгорания и взрыва из-за аммиака очень мала.

В заключение отметим, что цикл Калины был разработан для замены ранее использовавшегося цикла Ренкина в качестве «нижнего» цикла для комбинированных энергетических систем, а также для выработки электроэнергии с использованием низкотемпературных тепловых ресурсов. Для такого применения цикл Калины имеет лучшие термодинамические характеристики, чем цикл Ренкина [2].

Список литературы:

1. Korobitsyn, M.A. New and advanced energy conversion technologies. analysis of cogeneration, combined and integrated cycles / FeboDruk BV, Enschede. – 1998. – 135 p.
2. A.N.M Nihaj Uddin Shan. A Review of Kalina Cycle [Электронный ресурс]: International Journal of Smart Energy Technology and Environmental Engineering Volume 1, Issue 1, September 2020. – режим доступа: <http://globalpublisher.org/journals-1007/> (дата обращения: 29.10.2021)

Информация об авторах:

Ерёменко Михаил Александрович, студент гр. 10604117, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, д. 65, tes@bntu.by

Стрежик Александр Андреевич, студент гр. 10604117, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, д. 65, tes@bntu.by

Качан Светлана Аркадьевна, к.т.н., доцент, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, д. 65, kachan@bntu.by