
УДК 621.311.22:662.62]:62-176.2

СХЕМНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ УСТАНОВОК НА ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЕ, РЕАЛИЗУЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ ВАРИАНТЫ ЦИКЛА РЕНКИНА

© 2020 г. А. М. Клер¹, А. Ю. Маринченко^{1, *}, Ю. М. Потанина¹

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия

*e-mail: marinchenko@isem.irk.ru

Поступила в редакцию 17.02.2020 г.

После доработки 25.02.2020 г.

Принята к публикации 27.02.2020 г.

Исследуется установка, работающая по органическому циклу Ренкина (рабочее тело – пентан или бутан), установка, работающая по циклу Ренкина с традиционным рабочим телом – водой и комбинированная установка, в которой на “верхнем” температурном уровне используется вода, а на “нижнем” – органическое рабочее тело. Кроме того, исследуется теплофикационная установка на древесной биомассе, осуществляющая комбинированное производство тепла и электроэнергии. Для указанных вариантов были разработаны математические модели и сформированы оптимизационные задачи. Математическое моделирование и нелинейная оптимизация проводились с использованием разработанных в ИСЭМ СО РАН моделей и методов. В качестве критериев оптимизации рассматривались максимум КПД нетто и минимум цены электроэнергии при заданной внутренней норме возврата капиталовложений. Выполненные исследования показали более высокую энергетическую и экономическую эффективность при использовании бутана в качестве рабочего тела органического цикла Ренкина. Также было показано, что комбинированное производство электроэнергии и тепла позволяет поднять эксергетический КПД установки по сравнению с эксергетическим КПД установки, производящей только электроэнергию.

Ключевые слова: органический цикл Ренкина, энергетические установки, древесная биомасса, математическое моделирование, технико-экономические оптимизационные исследования

DOI: 10.31857/S0002331020020053

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России и ряде других стран в процессах лесозаготовок и деревопереработки образуются значительные объемы древесных отходов. Существенная часть этих отходов полезно не используется и со временем сгорает или разлагается с выделением в окружающую среду углекислого газа. Наиболее универсальным способом утилизации данных отходов является их использование для производства энергии. Из двух основных технологий использования твердого топлива в энергетике (сжигания и газификации) наиболее освоенной является сжигание с последующим использованием выделившегося тепла для производства электроэнергии в установках, реализующих различные варианты цикла Ренкина. Среди таких вариантов следует отметить традиционный цикл Ренкина (ТЦР) на воде и водяном паре, органический цикл Ренкина (ОЦР), где в котле нагревается (без кипения) высокотемпературный

теплоноситель (термомасло), отдающий тепло органическому рабочему телу (ОРТ), и комбинированный цикл Ренкина, в котором на “верхнем” температурном уровне используется водяной пар, а на “нижнем” – ОРТ.

Преимущество ОЦР перед ТЦР основано на более благоприятных термодинамических характеристиках органического рабочего тела. В первую очередь это относится к более низкой температуре насыщения при атмосферном давлении, чем у водяного пара, что позволяет сделать низкотемпературные элементы цикла (турбину ОЦР, конденсатор и регенеративный подогреватель) более компактными. Кроме того, указанные элементы работают при давлении выше атмосферного, что препятствует присосам воздуха в тракт органического рабочего тела.

Обзор рынка установок ОЦР, выбор рабочих тел, оптимизация параметров цикла, теплообменников представлен в ряде работ [1–11]. В предыдущей статье авторов [12] были проведены оптимизационные исследования указанных вариантов цикла Ренкина, причем для ОЦР рассматривалось только одно рабочее тело – пентан. В то же время эффективность ОЦР зависит от свойств ОРТ. В настоящей работе оптимизационные исследования выполнены для двух часто используемых рабочих тел – пентана и бутана, у которых температура насыщения при атмосферном давлении существенно различается (пентан – 309 К, бутан – 272.66 К). Также в [12] показана эффективность сушки древесной биомассы уходящими газами перед ее подачей в котел. Поэтому в настоящей работе варианты сравниваются только с этим видом сушки.

Целью настоящей работы является проведение оптимизационных исследований установок, сжигающих древесную биомассу. При этом исследуется установка, работающая по органическому циклу Ренкина (рабочее тело – пентан или бутан), установка, работающая по циклу Ренкина с традиционным рабочим телом – водой и комбинированная установка, в которой на “верхнем” температурном уровне используется вода, а на “нижнем” – пентан или бутан. Кроме того, исследуется теплофикационная установка на древесной биомассе, осуществляющая комбинированное производство тепла и электроэнергии.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВОК НА ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЕ

На рисунке 1 представлена расчетная схема установки, работающей по традиционному циклу Ренкина на водяном паре с сушкой топлива за счет тепла уходящих дымовых газов. Паровой котел состоит из экранированной топки, в которой осуществляется факельное сжигание топлива, с включением части экранов в испарительный контур. Кроме того, в топке располагается первая (радиационная) ступень пароперегревателя. Продукты сгорания из топки поступают последовательно в конвективные поверхности нагрева – пароперегреватель, экономайзер и воздухоподогреватель. Пар из пароперегревателя поступает в первый отсек паровой турбины. Часть пара, выходящего из этого отсека, направляется в регенеративный подогреватель высокого давления. Из второго отсека водяной пар отбирается на деаэрактор, из третьего – на регенеративный подогреватель низкого давления. Пар, отработавший в четвертом отсеке, направляется в конденсатор.

На рисунке 2 представлена расчетная схема установки, работающая по комбинированному ОЦР. Здесь водяной пар из четвертого отсека направляется в испаритель ОЦР. В испарителе водяной пар конденсируется внутри труб и отдает тепло ОРТ, который кипит в межтрубном пространстве. Далее пар рабочего тела направляется в турбину ОЦР, где расширяется и производит механическую работу. Из турбины этот пар поступает в конденсатор ОЦР, где отдает тепло охлаждающей воде. После конденсатора ОРТ в жидком виде подается в насос, где его давление повышается, и далее направляется в испаритель.

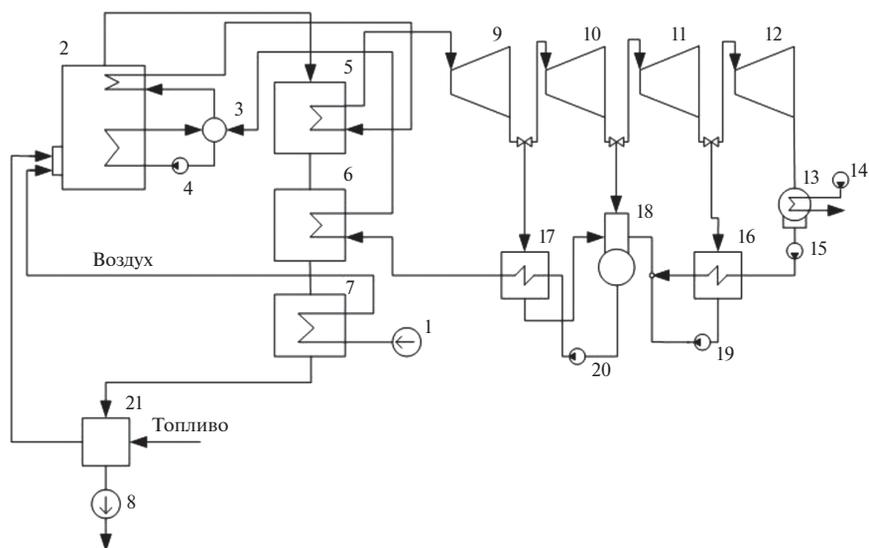


Рис. 1. Расчетная схема установки на древесной биомассе, работающей по традиционному циклу Ренкина на водяном паре: 1 – дутьевой вентилятор, 2 – топка, 3 – барабан-сепаратор, 4 – насос циркуляционного контура, 5 – пароперегреватель, 6 – водяной экономайзер, 7 – воздухоподогреватель, 8 – дымосос, 9–12 – отсеки паровой турбины, 13 – конденсатор, 14 – насос сетевой воды, 15 – конденсатный насос № 1, 16 – регенеративный подогреватель низкого давления, 17 – регенеративный подогреватель высокого давления, 18 – деаэратор, 19 – конденсатный насос № 2, 20 – питательный насос, 21 – сушилка топлива.

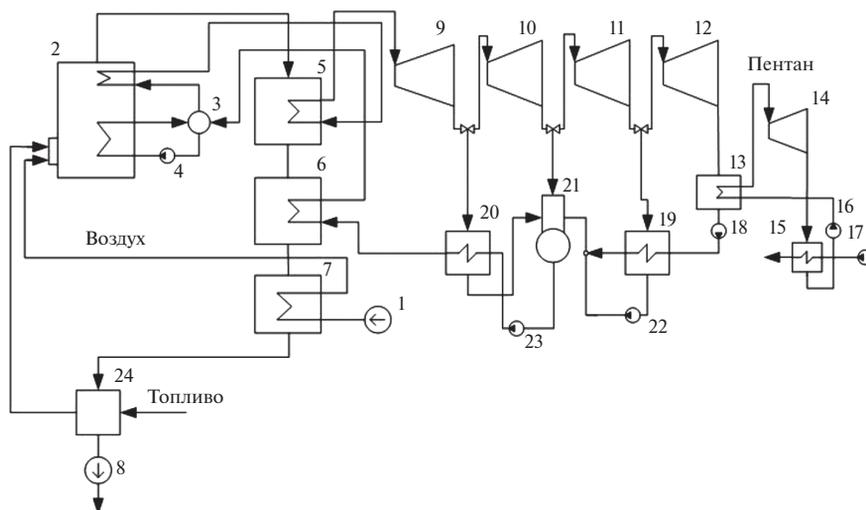


Рис. 2. Расчетная схема установки на древесной биомассе, работающей по комбинированному ОЦР: 1 – дутьевой вентилятор, 2 – топка, 3 – барабан-сепаратор, 4 – насос циркуляционного контура, 5 – пароперегреватель, 6 – водяной экономайзер, 7 – воздухоподогреватель, 8 – дымосос, 9–12 – отсеки паровой турбины, 13 – испаритель ОЦР, 14 – турбина ОЦР, 15 – конденсатор ОЦР, 16 – насос конденсата ОЦР, 17 – насос сетевой воды ОЦР, 18 – конденсатный насос № 1, 19 – регенеративный подогреватель низкого давления, 20 – регенеративный подогреватель высокого давления, 21 – деаэратор, 22 – конденсатный насос № 2, 23 – питательный насос, 24 – сушилка топлива.

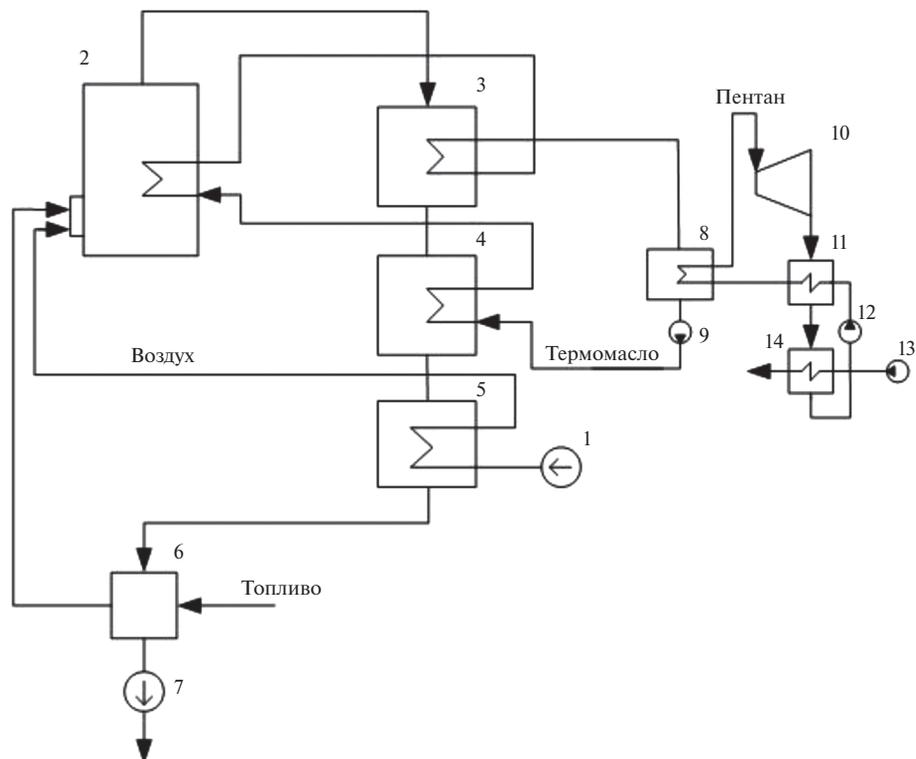


Рис. 3. Расчетная схема установки на древесной биомассе, работающей по классическому ОЦР с котлом на термомасле: 1 – дутьевой вентилятор, 2 – топка, 3 – подогреватель термомасла № 1, 4 – подогреватель термомасла № 2, 5 – воздухоподогреватель, 6 – сушилка топлива, 7 – дымосос, 8 – испаритель ОЦР, 9 – насос термомасла, 10 – турбина ОЦР, 11 – регенератор ОЦР, 12 – насос конденсата ОЦР, 13 – насос сетевой воды ОЦР, 14 – конденсатор ОЦР.

На рисунке 3 показана расчетная схема установки, работающей по классическому ОЦР с котлом на органическом теплоносителе (термомасле Dowtherm A [13]). Кипения термомасла в котле не происходит, оно последовательно проходит три ступени подогрева. При этом первая и третья ступени – конвективные, вторая, расположенная в топке – радиационная. Кроме того, в котле имеется воздухоподогреватель. Нагретое масло поступает в испаритель, где отдает тепло кипящему ОРТ. Пар ОРТ поступает в турбину, затем в регенератор, далее в конденсатор. В регенераторе пар нагревает конденсат ОРТ, поступающий из конденсатора, который затем подается в испаритель. Дымовые газы после воздухоподогревателя направляются на сушилку топлива.

Математические модели установок были созданы с помощью разработанного в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН программно-вычислительного комплекса “Система машинного построения программ”. Для расчета термодинамических и транспортных свойств рабочих тел, применяемых в ОЦР, был использован подход, основанный на построении интерполяционных зависимостей между заданными базовыми точками, в которых свойства известны. В качестве таких базовых точек использовались данные, приведенные в открытых источниках (например, [14]). Разработаны математические модели элементов органического цикла Ренкина: испарителя, конденсатора, турбины и насоса на органических рабочих телах. Кроме того, разработана модель сушильной установки древесной биомассы, позволяющей повысить ее

теплотворную способность перед подачей топлива в топку парового котла. Модели включают уравнения теплового и материального баланса, теплопередачи, сжатия и расширения рабочих тел и др.

В качестве критериев оптимизации были приняты максимум КПД и минимум цены электроэнергии (C_{el}) при заданном значении внутренней нормы возврата капиталовложений (IRR).

Цена электроэнергии C_{el} определяется из выражения [15]

$$C_{el} = \frac{(K_{уст}G + I_{топ}^{уст} + I_{уп}^{уст} + I_{ам}^{уст})}{E_{год}}, \quad (1)$$

где

$$G = \frac{\sum_{t=1}^{T_{стр}} \left(\frac{1}{1 + IRR} \right)^{t-1}}{T_{стр} \sum_{t=T_{стр}+1}^{T_{стр}+T_{экспл}} \left(\frac{1}{1 + IRR} \right)^{t-1}}. \quad (2)$$

Здесь $K_{уст}$ – капиталовложения в установку, $I_{топ}^{уст}$ – годовые топливные издержки, $I_{уп}^{уст}$ – годовые условно-постоянные эксплуатационные издержки, $I_{ам}^{уст}$ – годовые амортизационные отчисления, $E_{год}$ – годовой полезный отпуск электроэнергии, $T_{стр}$ – число лет строительства установки, $T_{экспл}$ – число лет эксплуатации установки. Принимается, что на протяжении всех лет эксплуатации годовые показатели не меняются, а капиталовложения в строительство делятся по его годам равномерно.

Стоимости турбин, насосов, дутьевых вентиляторов, дымососов определяется по удельным стоимостям их мощности, стоимость пароперегревателя, экономайзера, воздухоподогревателя, регенеративных подогревателей и других теплообменники – по удельной стоимости массы металла или площади теплообменных поверхностей. Учитываются составляющие капиталовложений, зависящие от электрической мощности, объема топлива, стоимости основного оборудования и др. Кроме того, учитывается постоянная, в пределах заданного диапазона мощности, часть капиталовложений. В работе принято, что полезная мощность должна лежать в диапазоне 15–16 МВт. Заданное значение IRR было принято равным 12%, цена топлива – 20 долл./т у. т.

Подробная постановка задач оптимизации и методика расчета капиталовложений в установку представлена в работе [15].

Математические модели установок, в зависимости от рабочих тел и вариантов схем, содержат от 248 до 401 информационно-входных, от 268 до 451 информационно-выходных и от 5 до 13 итерационно уточняемых параметров. В качестве оптимизируемых были приняты расходы теплоносителей и рабочих тел, их термодинамические параметры и конструктивные параметры отдельных элементов установок. Учитывались системы нелинейных ограничений-неравенств (таких, как механическое напряжение материала труб, максимальная температура стенки трубы, концевые температурные напоры в теплообменниках и др.), определяющих области, в которых работа установки технически и физически допустима. Всего оптимизировалось от 22 до 33 параметров и учитывалось от 49 до 82 ограничений – неравенств.

При расчете были приняты следующие исходные данные. Характеристики топлива [11]: $Q_i^r = 10048$ кДж/кг, $W^r = 40\%$, $A^r = 1\%$, $S^r = 0.1\%$, $C^r = 29\%$, $H^r = 2.9\%$, $N^r = 0.6\%$, $O^r = 26.4\%$, где Q_i^r – низшая теплотворная способность влажного топлива, W^r , A^r , S^r , C^r , H^r , N^r , O^r – весовые доли (в %) на рабочую массу древесного топлива

Таблица 1. Оптимальные характеристики установки, работающей по традиционному циклу Ренкина на воде и водяном паре

Наименование	Критерии эффективности: 1 – максимум КПД нетто, 2 – минимум цены электроэнергии	
	1	2
Расход топлива, кг/с	4.31	4.4
Температура воздуха на входе в топку, °С	215.8	105.9
Расход воздуха на входе в топку, кг/с	18.9	18.4
Температура воды на выходе из водяного экономайзера, °С	297	287
Расход острого пара, кг/с	16.12	16.13
Давление острого пара, МПа	8.15	7.13
Температура острого пара, °С	497	476
Давление пара на входе в конденсатор, МПа	0.006	0.0046
Температура воды на выходе из подогревателя низкого давления, °С	105	94
Температура воды на выходе из подогревателя высокого давления, °С	195	184
Температура газа на входе в сушилку, °С	250	250
Температура уходящих газов, °С	113	122
Площадь теплообменной поверхности экономайзера, м ²	502.87	497.11
Площадь теплообменной поверхности пароперегревателя, м ²	495.4	178.64
Площадь теплообменной поверхности воздухоподогревателя, м ²	350.25	210.97
Площадь теплообменной поверхности подогревателя низкого давления, м ²	28.8	29.2
Площадь теплообменной поверхности подогревателя высокого давления, м ²	21.7	22.6
Мощность паровой турбины, МВт	16.22	16.53
Полезная мощность установки, МВт	15.68	15.99
КПД нетто, %	36.47	36.1
Капиталовложения, млн долл.	15.985	15.780
Удельный расход топлива, г у.т./кВт ч	336.92	339.69
Удельные капиталовложения, долл./кВт	1019.7	986.2
Цена электроэнергии	3.51	3.42

воды, золы, серы, углерода, водорода, азота и кислорода. Принималось, что после сушки влажность топлива снижалась до 20%, а низшая теплота сгорания возрастала до 14124 кДж/кг. При оптимизации принято, что температура уходящих газов, направляемых на сушилку древесной биомассы, должна находиться в диапазоне 250–300°С, а давление пара в конденсаторе пентана не должно быть ниже атмосферного (что обеспечивает отсутствие присосов воздуха в контур ОРТ).

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты оптимизационных расчетов варианта с традиционным циклом Ренкина на воде и водяном паре представлены в табл. 1.

Таблица 2. Оптимальные характеристики расчета схем комбинированной установки с органическим циклом Ренкина

Наименование	Рабочие тела ОЦР			
	Пентан		Бутан	
	Критерии эффективности: 1 – максимум КПД нетто, 2 – минимум цены электроэнергии			
	1	2	1	2
Расход топлива, кг/с	4.41	4.93	3.97	4.7
Температура воздуха на входе в топку, °С	221.32	162.85	247.88	168.79
Расход воздуха на входе в топку, кг/с	19.4	21.7	16.59	19.7
Температура воды на выходе из водяного экономайзера, °С	284	290	190	199
Давление острого пара, МПа	6.69	7.38	9.35	8.98
Температура острого пара, °С	496	476	468	457
Расход острого пара, кг/с	17.46	18.69	15.88	18.44
Давление водяного пара на входе в испаритель ОЦР, МПа	0.147	0.25	0.11	0.117
Температура водяного пара на входе в испаритель ОЦР, °С	140.7	157.4	117	124
Температура воды на выходе из испарителя ОЦР, °С	111	116	102	103
Расход пара ОРТ на входе в турбину, кг/с	67.09	71.08	59.01	71.4
Давление пара ОРТ на входе в турбину, МПа	0.67	0.87	1.46	1.18
Температура пара ОРТ на входе в турбину, °С	105.6	118	99	88
Давление пара ОРТ на входе в конденсатор, МПа	0.126	0.125	0.238	0.293
Температура пара ОЦР на входе в конденсатор, °С	66	73	43	45
Расход воды на конденсатор ОЦР, кг/с	221.74	289.42	996.6	948.3
Температура газа на входе в сушику, °С	250	250	250	250
Температура уходящих газов, °С	98	114	94	100
Площадь теплообменной поверхности водяного экономайзера, м ²	2035.61	577.17	1733.5	541.8
Площадь теплообменной поверхности пароперегревателя, м ²	581.27	194.82	322.7	139.5
Площадь теплообменной поверхности воздухоподогревателя, м ²	1474.92	319.82	1571.8	436.2
Площадь теплообменной поверхности испарителя пентана, м ²	3877.15	1721.45	3975.9	1481.2
Площадь теплообменной поверхности конденсатора пентана, м ²	1004.95	651.85	1882.8	757.2
Мощность паровой турбины, МВт	12.14	11.98	11.2	12.46
Мощность турбины ОЦР, МВт	3.58	4.56	3.84	3.54
Полезная мощность установки, МВт	15.28	15.98	15.03	16.0
КПД нетто, %	34.74	32.26	37.7	33.86
Капиталовложения, млн долл.	19.309	16.746	19.398	16.059
Удельный расход топлива, г у.т./кВт ч	353.68	380.79	325.88	362.89
Удельные капиталовложения, долл./кВт	1263.6	1047.8	1291.1	1003.7
Цена электроэнергии цент/кВт ч	4.22	3.67	4.23	3.51

Для этой установки максимальный КПД нетто составляет 36.47%, а минимальная цена электроэнергии – 3.42 цент/кВт ч. При этом оптимальное давление острого пара лежит в диапазоне 7.13–8.15 МПа, а оптимальная температура пара – в диапазоне 476–497°С.

Результаты оптимизации варианта с комбинированной установкой с органическим циклом Ренкина представлены в табл. 2.

Как видно, если в установке в качестве рабочего тела ОЦР используется пентан, то ее максимальный КПД нетто равен 34.74%, что несколько ниже, чем для установки, работающей по традиционному циклу Ренкина. Если используется бутан, то ее максимальный КПД нетто достигает максимального значения для всех рассмотренных установок и составляет 37.7%. В то же время критерий экономической эффективности как для установки, использующей пентан, так для установки использующей бутан имеет более низкие показатели, чем ТЦР. Минимальная цена электроэнергии – 3.67 цент/кВт ч для пентана и 3.51 цент/кВт ч для бутана.

Результаты оптимизации установки, работающей по классическому циклу ОЦР, представлены в табл. 3.

Как видно, этот вариант имеют существенно более низкий КПД – 16.48–17.45% для пентана и 14.89–16.12% для бутана, а также значительно более высокую цену электроэнергии – 5.45–6.06 цент/кВт ч для пентана и 4.95–6.27 цент/кВт ч для бутана. При этом установка, в которой использовался в качестве рабочего тела ОЦР бутан, имеет более низкие значения КПД, но более лучшие экономические показатели, чем при использовании пентана.

ОПТИМИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ НА ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЕ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В регионах РФ, где имеются значительные объемы древесных отходов, существует потребность как в электрической, так и тепловой энергии. В первую очередь это относится к автономным потребителям, не включенным в централизованную систему электроснабжения.

Комбинированное производство тепла и электроэнергии позволяет экономить топливо, снижать цену производства энергии и сокращать вредные выбросы в окружающую среду. Поэтому целесообразно провести оптимизационные исследования энергетической установки на древесной биомассе, осуществляющей комбинированное производство тепловой и электрической энергии.

В качестве такой установки в настоящей работе принята установка, работающая по комбинированному циклу Ренкина с ОРТ – пентаном. Технологическая схема этой установки приведена на рис. 4.

В качестве критерия экономической эффективности для данной установки рассматривается минимум цены единицы отпущенной эксергии (при этом учитывается отпуск эксергии в виде электроэнергии и в виде тепла). Принимается, что отпуск эксергии в виде электроэнергии равен отпуску электроэнергии. Эксергия, отпускаемая с теплом, рассчитывается отдельно, зависит от температурного графика сетевой воды и существенно (примерно в четыре раза) ниже величины отпускаемого тепла. Стоимость отпускаемой эксергии C_{ex} определялась по формуле аналогичной (1), с учетом эксергии тепла:

$$C_{ex} = \frac{(K_{уст}G + I_{топ}^{уст} + I_{уп}^{уст} + I_{ам}^{уст})}{E_{год} + Q_{год}}, \quad (3)$$

где $Q_{год}$ – годовой полезный отпуск теплоэксергии, одинаковый для всех лет эксплуатации установки, G определяется по формуле (2).

Цена электроэнергии принималась равной цене эксергии, цена тепла $C_{теп}$ определялась по формуле:

$$C_{теп} = C_{ex} \frac{Q_{теп}^{уст}}{Q_{год}}, \quad (4)$$

где $Q_{теп}^{уст}$ – полный годовой отпуск теплоэнергии.

Таблица 3. Оптимальные характеристики расчета схемы комбинированной установки с котлом на термомасле и органическим циклом Ренкина

Наименование	Рабочие тела ОЦР			
	Пентан		Бутан	
	Критерии эффективности: 1 – максимум КПД нетто, 2 – минимум цены электроэнергии			
	1	2	1	2
Расход топлива, кг/с	8.6	9.4	10.03	9.8
Температура воздуха на входе в топку, °С	91	101	87	97
Расход воздуха на входе в топку, кг/с	35.9	39.3	41.9	40.1
Температура термомасла на выходе из подогревателя № 2, °С	292	234	135	163
Давление термомасла на выходе из подогревателя № 1, МПа	0.42	0.64	0.54	0.67
Температура термомасла на выходе из подогревателя № 1, °С	363	344	338	333
Температура термомасла на выходе из испарителя пентана, °С	195	171	104	121
Расход термомасла, кг/с	189.6	237.7	202.6	217.3
Расход пентана, кг/с	189.9	209.2	230.9	223.2
Давление пара пентана на входе в турбину, МПа	1.67	1.82	1.53	1.93
Температура пара пентана на входе в турбину, °С	155	159	100	114
Давление пара пентана на входе в регенератор, МПа	0.13	0.14	0.22	0.23
Температура пара пентана на входе в регенератор, °С	89	91	41	46
Температура конденсата пентана на входе в регенератор, °С	35	44	18	25
Температура конденсата пентана на выходе из регенератора, °С	74	79	37	43
Давление пара пентана на входе в конденсатор, МПа	0.11	0.12	0.21	0.22
Температура пара пентана на входе в конденсатор, °С	42	47	21	22
Расход воды на конденсатор пентана, кг/с	633.9	602.5	5946	7403
Температура газа на входе в сушику, °С	250	250	250	250
Температура уходящих газов, °С	53	72	58	67
Площадь теплообменной поверхности подогревателя № 1, м ²	1604.7	637.7	2276.3	539.7
Площадь теплообменной поверхности подогревателя № 2, м ²	2486.8	935.8	2635.9	871.9
Площадь теплообменной поверхности воздухоподогревателя, м ²	1849.3	891.5	845.9	415.3
Площадь теплообменной поверхности испарителя пентана, м ²	1527.2	917.3	4085.1	1511.3
Площадь теплообменной поверхности регенератора пентана, м ²	8897.8	4671.1	1764.9	728.1
Площадь теплообменной поверхности конденсатора пентана, м ²	1432.3	1175.9	5569.6	2309.4
Мощность турбины на пентане, МВт	16.16	16.99	16.16	16.83
Полезная мощность установки, МВт	15.02	15.65	15.0	15.89
КПД нетто, %	17.45	16.48	16.12	14.89
Капиталовложения, млн долл.	25.207	22.735	24.981	19.647
Удельный расход топлива, г у.т./кВт ч	704.1	745.3	762.0	825.14
Удельные капиталовложения, долл./кВт	1677.4	1462.4	1665.5	1236.3
Цена электроэнергии	6.06	5.45	6.27	4.95

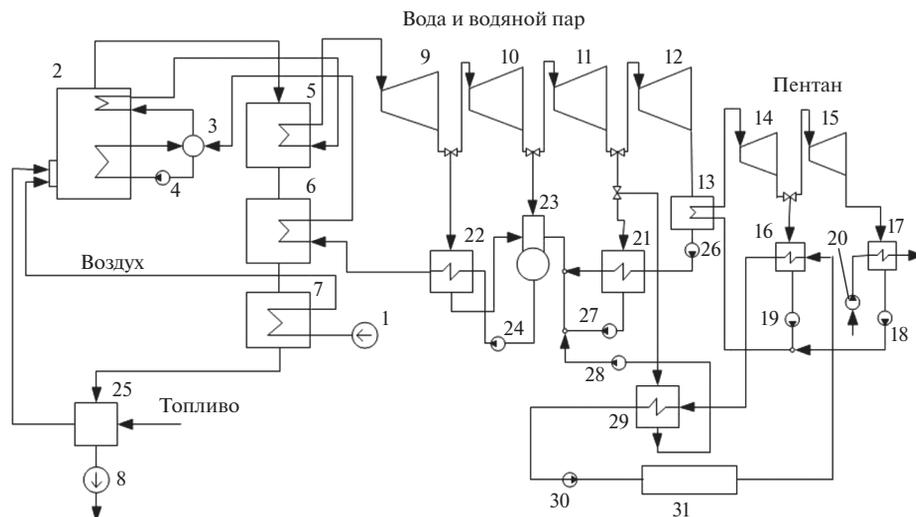


Рис. 4. Расчетная схема установки на древесной биомассе, работающей по комбинированному ОЦР с теплофикацией: 1 – дутьевой вентилятор, 2 – топка, 3 – барабан-сепаратор, 4 – насос циркуляционного контура, 5 – пароперегреватель, 6 – водяной экономайзер, 7 – воздухоподогреватель, 8 – дымосос, 9–12 – отсеки паровой турбины, 13 – испаритель ОЦР, 14–15 – отсеки турбины ОЦР, 16 – подогреватель сетевой воды ОЦР, 17 – конденсатор ОЦР, 18–19 – насосы конденсата ОЦР, 20 – насос охлаждающей воды ОЦР, 21 – регенеративный подогреватель низкого давления, 22 – регенеративный подогреватель высокого давления, 23 – деаэрактор, 24 – питательный насос, 25 – сушилка топлива, 26–28 конденсатные насосы, 29 – подогреватель сетевой воды, 30 – циркуляционный насос, 31 – потребитель тепла.

В настоящей работе сделано допущение, что тепловая и энергия поставляется промышленному потребителю с постоянной нагрузкой как в суточном, так и в годовом разрезе. При этом число часов использования установленных электрической и тепловой мощности одинаково.

Математическая модель установки состоит из 512 информационно-входных, 562 информационно-выходных и 15 итерационно уточняемых параметров. В качестве оптимизируемых были приняты расходы теплоносителей и рабочих тел, их термодинамические параметры и конструктивные параметры отдельных элементов установки. Учитывались системы нелинейных ограничений-неравенств, определяющих области, в которых работа установки технически и физически допустима. Всего оптимизировалось 44 параметров и учитывалось от 114 ограничений-неравенств.

Тепловые и электрические нагрузки в расчётах приняты характерными для горно-обогатительного предприятия: электрическая нагрузка в диапазоне 15–16 МВт с равномерным графиком в течение года и расчётной тепловой нагрузкой (с преобладанием технологической нагрузки, не зависящей от температуры наружного воздуха). Был принят расчётный температурный график технологической воды 110/50°С.

При проведении оптимизационных исследований сначала решались задачи максимизации эксергетического КПД установки и минимизации цены эксергии. При этом были определены оптимальные тепловые нагрузки. Так как требуемая в технологическом цикле тепловая нагрузка не всегда совпадает с максимальной, были проведены несколько оптимизационных расчетов по минимизации цены эксергии установки при фиксированных тепловых нагрузках.

В таблице 4 представлены показатели установки при максимальном эксергетическом КПД и минимальной цене эксергии с максимальной и частичными тепловыми нагрузками.

Таблица 4. Оптимальные параметры установки с комбинированным отпуском тепла и электроэнергии в расчетном режиме и среднегодовые показатели

Наименование	Критерии эффективности: 1 – максимум эксергетического КПД, 2 – минимум цены эксергии				
	1	2			
		Тепловая нагрузка, Гкалл/ч			
		Максимум	30	15	5
Расход топлива, кг/с	5.6	7.2	6.0	5.6	5.2
Температура воздуха на входе в топку, °С	197	82	110	124	116
Расход воздуха на входе в топку, кг/с	23.3	29.6	25.2	23.4	21.7
Температура воды на выходе из водяного экономайзера, °С	308	253	262	304	308
Давление острого пара, МПа	9.4	6.7	9.4	9.6	9.6
Температура острого пара, °С	501	520	485	480	482
Расход острого пара, кг/с	23.2	25.8	24.2	22.7	20.3
Давление водяного пара на входе в испаритель пентана, МПа	0.11	0.14	0.12	0.13	0.12
Температура водяного пара на входе в испаритель пентана, °С	105	111	109	109	109
Температура воды на выходе из испарителя пентана, °С	101	107	104	105	104
Расход пара пентана на входе в первый отсек турбины, кг/с	66.7	52.6	46.7	58.4	69.1
Давление пара пентана на входе в первый отсек турбины, МПа	0.57	0.55	0.47	0.51	0.46
Температура пара пентана на входе в первый отсек турбины, °С	99	97	91	94	92
Температура воды на входе в подогреватель технологической воды ОЦР, °С	50	50	50	50	50
Температура воды на выходе подогревателя технологической воды ОЦР, °С	84	69	70	69	75
Расход пара пентана на входе во второй отсек турбины, кг/с	8.7	8.4	12.9	42.7	61.5
Давление пара пентана на входе во второй отсек турбины, МПа	0.46	0.4	0.4	0.35	0.4
Температура пара пентана на входе во второй отсек турбины, °С	93	90	86	85	87
Давление пара пентана на входе в конденсатор, МПа	0.16	0.19	0.13	0.16	0.14
Температура пара пентана на входе в конденсатор, °С	68	74	62	66	63
Расход воды на конденсатор пентана, кг/с	32	22	61	147	264
Температура воды на выходе подогревателя технологической воды, °С	110	110	110	110	110
Температура газа на входе на сушку, °С	250	250	250	250	250
Температура уходящих газов, °С	87	112	127	131	128
Площадь теплообменной поверхности водяного экономайзера, м ²	1543	888	686	657	607
Площадь теплообменной поверхности пароперегревателя, м ²	618	211	173	165	168

Таблица 4. Окончание

Наименование	Критерии эффективности: 1 – максимум эксергетического КПД, 2 – минимум цены эксергии				
	1	2			
		Тепловая нагрузка, Гкалл/ч			
	Максимум	30	15	5	
Площадь теплообменной поверхности воздухоподогревателя, м ²	1152	384	439	463	402
Площадь теплообменной поверхности испарителя пентана, м ²	5671	262	267	242	283
Площадь теплообменной поверхности подогревателя технологической воды ОЦР, м ²	1756	382	312	303	241
Площадь теплообменной поверхности конденсатора пентана, м ²	1222	207	279	437	723
Площадь теплообменной поверхности подогревателя технологической воды, м ²	243	426	312	163	86
Тепловая нагрузка потребителя тепла, Гкалл/ч	28.9	41.3	30	15	5
Эксергетическая нагрузка потребителя тепла, Гкалл/ч	5.4	7.6	5.6	2.8	0.93
Мощность паровой турбины, МВт	16.04	16.11	16.19	15.22	14.52
Мощность турбины на пентане, МВт	0.69	0.687	0.653	1.73	2.38
Полезная мощность установки, МВт	15.96	15.95	15.96	15.98	15.96
Эксергетический КПД, %	39.61	36.97	34.52	34.17	32.75
Капиталовложения, млн долл.	21.707	17.493	16.835	16.743	16.554
Удельный расход топлива на единицу отпущенной эксергии, г у.т./кВт ч	310.2	336.3	355.9	359.5	375.1
Удельные капиталовложения, долл./кВт	1359.9	1096.6	1054.7	1047.9	1037.5
Среднегодовая цена отпущенной эксергии*, цент/кВт ч	3.53	2.67	2.75	3.14	3.44
Среднегодовая цена отпущенного тепла, долл./Гкалл	7.17	5.73	5.91	6.75	7.41

* Равна среднегодовой цене отпущенной электроэнергии.

Как видно из полученных результатов, комбинированное производство электроэнергии и тепла позволяет поднять эксергетический КПД установки по сравнению с эксергетическим КПД установки, производящей только электроэнергию, и снизить по сравнению с этой установкой стоимость единицы отпущенной эксергии. Наилучшие технико-экономические показатели достигаются при максимальной тепловой нагрузке равной 41.3 Гкалл/ч. При уменьшении тепловой нагрузки до 5 Гкалл/ч, уменьшается эксергетический КПД установки (с 36.97% до 32.75%), увеличивается стоимость электроэнергии (с 2.67 до 3.44 цент/кВт ч) и тепла (с 5.73 до 7.41 долл./Гкалл). Следует отметить, что при снижении расчетной тепловой нагрузки увеличивается мощность пентановой турбины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление результатов оптимизационных расчетов показывает следующее.

Наихудшие показатели энергетической и экономической эффективности имеет вариант с классическим органическим циклом Ренкина. Это объясняется невысоким КПД цикла, связанным с низкой температурой пара ОРТ после испарителя. При этом существенно увеличивается количество передаваемого тепла, что приводит к увеличению расхода сжигаемого топлива и росту площади теплопередающих поверхностей.

Экономические и энергетические характеристики чисто парового цикла и комбинированного цикла достаточно близки. При этом некоторое преимущество имеет традиционный цикл Ренкина на воде. Вместе с тем комбинированный цикл обеспечивает компактность турбины ОЦР, по сравнению с ЦНД турбины на водяном паре, за счет значительно более высокого давления ОРТ на выходе из турбины.

Комбинированное производство электроэнергии и тепла позволяет поднять эксергетический КПД установки по сравнению с эксергетическим КПД установки, производящей только электроэнергию. При этом, цена электроэнергии для двухцелевой установки (электроэнергия + тепло) падает, по сравнению с ценой электроэнергии одноцелевой установки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-01068а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thomas Tartière, Marco Astolfi*. A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market. *Energy Procedia*. 2017. V. 129. P. 2–9.
2. *Alireza Javanshir, Nenad Sarunac*. Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle. *Energy*. 2017. V. 118. P. 85–96.
3. *Yulin Zhu, Weiyi Li, Jun Li, Haojie Li, Yongzhen Wang, Shuai Li*. Thermodynamic analysis and economic assessment of biomass-fired organic Rankine cycle combined heat and power system integrated with CO₂ capture. *Energy Conversion and Management*. 2020. V. 204. P. 112310.
4. *Wang Y.Z., Zhao J., Wang Y., An Q.S.* Multi-objective optimization and grey relational analysis on configurations of organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*. 2017. V. 114. P. 1355–1363.
5. *Noussan Michel, Abdin Giulio Cerino, Poggio Alberto, Roberto Roberta*. Biomass-fired CHP and heat storage system simulations in existing district heating systems. *Applied Thermal Engineering*. 2014. V. 71. P. 729–735.
6. *Macchi Ennio, Astolfi Marco*. Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications // Woodhead Publishing, Elsevier, 2017. 249 p.
7. *Gimelli A., Luongo A., Muccillo M.* Efficiency and cost optimization of a regenerative Organic Rankine Cycle power plant through the multi-objective approach. *Applied Thermal Engineering*. 2017. V. 114. P. 601–610.
8. *Li Gang*. Organic Rankine cycle performance evaluation and thermoeconomic assessment with various applications part II: Economic assessment aspect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. V. 64. P. 490–505.
9. *Готовский М.А., Гринман М.И., Фомин В.А., Арефьев В.К., Григорьев А.А.* Использование комбинированного пароводяного и органического циклов Ренкина для повышения экономичности ГТУ и ДВС // Теплоэнергетика. 2012. № 3. С. 56.
10. *Жуков А.В., Федорев С.А., Гоман В.В., Щеклеин С.Е.* Когенерационная установка на базе СО-газогенератора и ОЦР-электропарогенератора, работающая на биотопливе // Промышленная энергетика. 2015. № 7. С. 40–43.
11. *Пугач Л.И.* Нетрадиционная энергетика – возобновляемые источники, использование биомассы, термомеханическая подготовка, экологическая безопасность: учеб. Пособие / Л.И. Пугач, Ф.А. Серант, Д.Ф. Серант. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 347 с.
12. *Клер А.М., Маринченко А.Ю., Потанина Ю.М., Жарков П.В.* Оптимизационные исследования энергогенерирующих установок на древесной биомассе, реализующих органический цикл Ренкина // Известия РАН. Энергетика. 2019. № 6. С. 110–120.
13. www.dow.com
14. http://www.coolprop.org/fluid_properties/fluids/index.html
15. *Kler A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O.* Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods. *Energy*. 2019. V. 189. P. 116230.

Scheme-Parametric Optimization of Power Plants on Wood Biomass That Implement Various Variants of the Rankin Cycle

A. M. Kler^a, A. Yu. Marinchenko^{a, *}, and Yu. M. Potanina^a

^a*Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

^{*}*e-mail: marinchenko@isem.irk.ru*

The purpose of this work is to conduct optimization studies of power plants that burn wood biomass. In this case, a power plant operating according to the organic Rankine cycle (working fluid is a pentane or butane), power plant, operating on the Rankine cycle with the traditional working fluid – water and a combined power plant, in which the “upper” temperature level is water, and the “lower” organic working fluid. In addition, a wood biomass power plant that produces combined heat and electricity is being investigated. For these options, mathematical models were developed and optimization problems were formed. Mathematical modeling and nonlinear optimization were carried out using models and methods developed at ISEM SB RAS. The optimization criteria were considered the maximum net efficiency and the minimum electricity price for a given internal rate of return on investment. The performed studies showed higher energy and economic efficiency when using butane as the working fluid of the Rankine organic cycle. It was also shown that the combined production of electricity and heat makes it possible to increase the exergy efficiency of the power plant as compared to the exergy efficiency of the power plant that produces only electricity.

Keywords: Organic Rankine Cycle, power plants, wood biomass, mathematical modeling, technical and economic optimization studies