

---

---

УДК 621.311.22:662.62:62-176.2

## ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК НА ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЕ, РЕАЛИЗУЮЩИХ ОРГАНИЧЕСКИЙ ЦИКЛ РЕНКИНА

© 2019 г. А. М. Клер<sup>1</sup>, А. Ю. Маринченко<sup>1</sup>, Ю. М. Потанина<sup>1</sup>\*, П. В. Жарков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия

\*e-mail: julia@isem.irk.ru

Поступила в редакцию 26.11.2019 г.

После доработки 27.11.2019 г.

Принята к публикации 28.11.2019 г.

Статья посвящена оптимизационным исследованиям энергетических установок на древесной биомассе, работающих по различным вариантам цикла Ренкина. Это “классический” органический цикл Ренкина, когда в котле нагревается термомасло, отдающее тепло органическому рабочему телу (пентану), пар которого расширяется в турбине; “традиционный” цикл Ренкина на воде и водяном паре и комбинированный цикл, когда в котле получается перегретый водяной пар, который после расширения в турбине поступает в испаритель органического рабочего тела, пар которого расширяется в “пентановой” турбине. Поскольку древесная биомасса (отходы лесозаготовок и деревообработки), как правило, имеют высокую влажность, рассматриваются варианты ее предварительной сушки уходящими газами или горячим воздухом, а также вариант без сушки, с подачей в топку котла “сырой” древесной биомассы. 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 позволили провести оценку энергетической и экономической эффективности сопоставляемых вариантов.

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

DOI: 10.1134/S0002331019060062

### ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть древесной биомассы в виде отходов лесозаготовок и деревообработки, имеющаяся в настоящая время во многих регионах РФ, особенно на востоке страны, не вовлечена в процесс производства электрической и тепловой энергии. Полезное использование древесного топлива в энергетических установках позволяет, во многих случаях, сократить количество вредных выбросов и повысить экономичность по сравнению с другим видом твердого топлива. Для систем автономного энергоснабжения отдаленных территорий это является особенно актуальным.

Прямое сжигание древесной биомассы в энергетических установках, по сравнению с ее газификацией, является более технологически освоенным процессом. В таких установках реализуется термодинамический цикл Ренкина – традиционный на воде и

водяном паре, и органический цикл Ренкина с использованием органических рабочих тел (ОЦР).

Исследования установок ОЦР отражены в значительном количестве работ, например, [1–9]. Рассматривались вопросы выбора рабочих тел, оптимизации параметров цикла, теплообменников, был представлен обзор рынка установок. Однако в указанных работах не проводилась согласованная оптимизация параметров цикла и конструктивных параметров отдельных элементов, а также сопоставление с традиционным циклом Ренкина. Это значительно снижало обоснованность принимаемых схемно-параметрических решений. Для решения таких задач в ИСЭМ СО РАН были разработаны эффективные методы математического моделирования и оптимизации параметров сложных ТЭУ [10, 11].

Целью настоящей работы является проведение оптимизационных исследований установок, сжигающих древесную биомассу. При этом исследуется установка, работающая по органическому циклу Ренкина (рабочее тело – пентан), 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. Кроме того, рассматриваются варианты с сушкой древесной биомассы перед подачей в котел, при этом сушка осуществляется дымовыми газами или горячим воздухом. Дополнительно рассматривается вариант, когда сушка не производится.

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВОК НА ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЕ

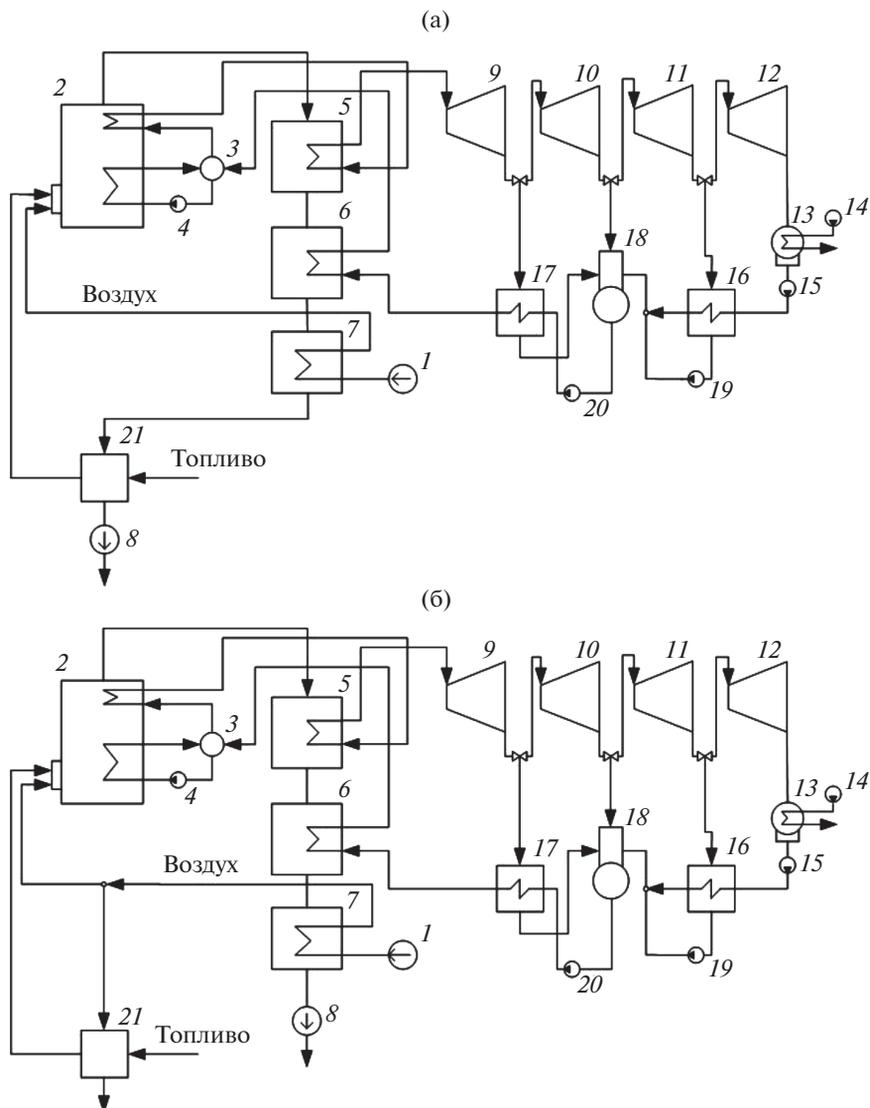
На рисунке 1 представлена расчетная схема установки, работающей по традиционному циклу Ренкина на водяном паре с сушкой топлива за счет тепла уходящих дымовых газов (рис. 1а) и сушкой топлива за счет отбора части воздуха после воздухоподогревателя (рис. 1б). Кроме того, рассматривается вариант без сушки, в котором весь подогретый воздух направляется в котел на сжигание биомассы.

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 деаэратор, из третьего – на регенеративный подогреватель низкого давления. Пар, отработавший в четвертом отсеке, направляется в конденсатор.

Как будет показано далее, наиболее эффективным как по экономической, так и по энергетической эффективности, является сушка уходящими газами, поэтому при исследовании установки с ОЦР и комбинированной установки ОЦР рассматривается только такой вариант сушки.

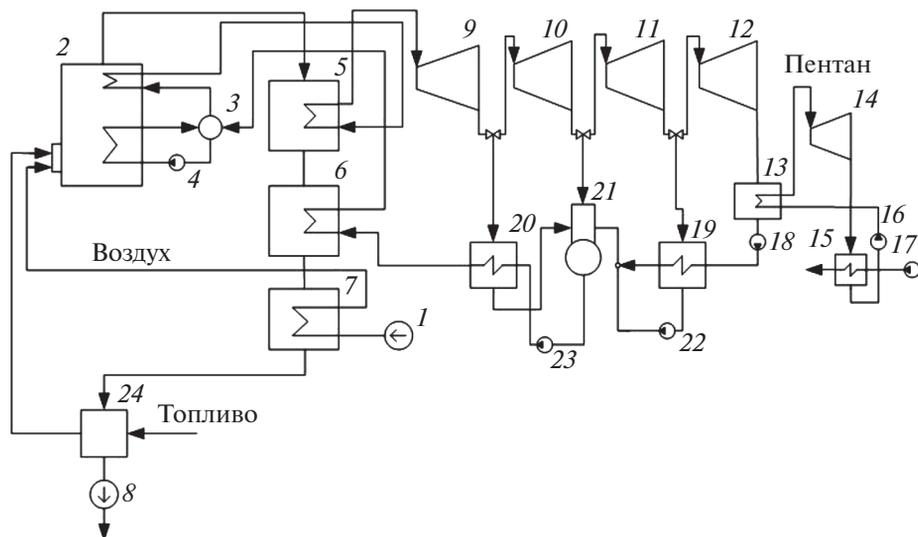
На рисунке 2 представлена расчетная схема установки комбинированного ОЦР. Здесь водяной пар из четвертого отсека направляется в испаритель ОЦР. В испарителе водяной пар конденсируется внутри труб и отдает тепло пентану, который кипит в межтрубном пространстве. Далее пар пентана направляется в турбину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

На рисунке 3 показана расчетная схема установки, работающей по классическому ОЦР с котлом на органическом теплоносителе (термомасле Dowtherm A [12]). Кипения термомасла в котле не происходит, оно последовательно проходит три ступени



**Рис. 1.** Расчетная схема установки на древесной биомассе, работающей по традиционному циклу Ренкина на водяном паре. (1а) – с сушкой дымовыми газами, (1б) – с сушкой воздухом. 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 – деаэрактор, 19 – конденсатный насос № 2, 20 – питательный насос, 21 – сушилка топлива.

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 органическому рабочему телу (пентану). Пентановый пар поступает в турбину, затем в регенератор, далее в конденсатор. В регенераторе пар нагревает конденсат пентана, поступающий из конден-



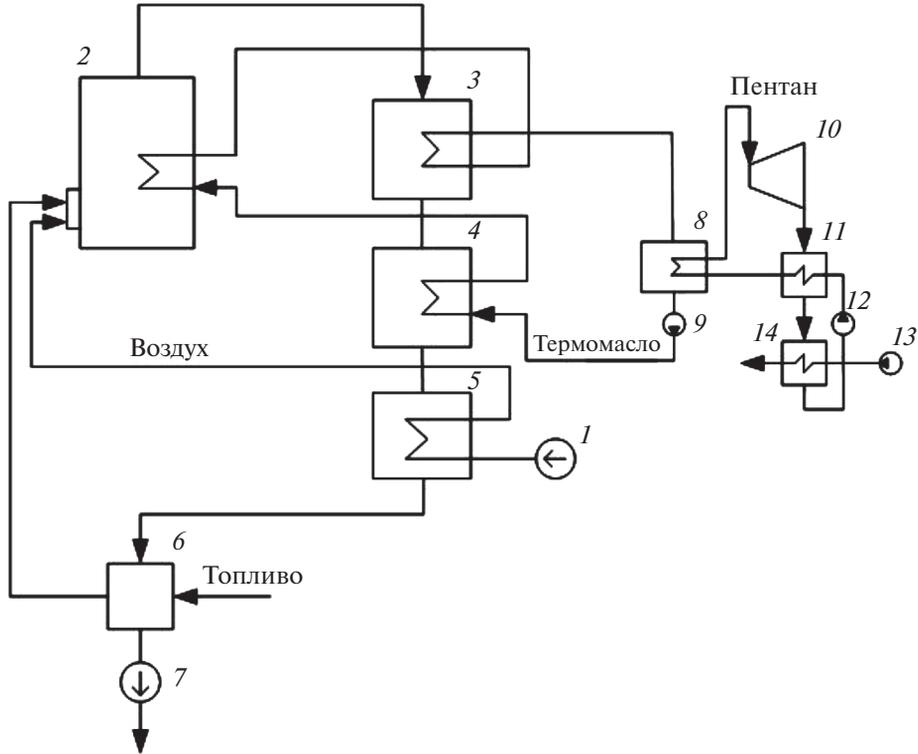
**Рис. 2.** Расчетная схема установки на древесной биомассе, работающей по комбинированному ОЦР. 1 – дутьевой вентилятор, 2 – топка, 3 – барабан-сепаратор, 4 – насос циркуляционного контура, 5 – пароперегреватель, 6 – водяной экономайзер, 7 – воздухоподогреватель, 8 – дымосос, 9–12 – отсеки паровой турбины, 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 – деаэрактор, 22 – конденсатный насос № 2, 23 – питательный насос, 24 – сушилка топлива.

сатора, который затем подается в испаритель. Дымовые газы после воздухоподогревателя направляются на сушку 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 (СМПП)”. 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 [13] и 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, позволяющая 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 критерия экономической эффективности был принят минимум цены электроэнергии ( $C_{el}$ ) при заданном значении внутренней нормы возврата капиталовложений (IRR). При определении  $C_{el}$  для энергетической установки были сделаны следующие допущения, практически не влияющие на определение  $C_{el}$ .

1. Установка работает в базовой части графика электрических нагрузок энергосистемы, поэтому рассматривается номинальный режим работы. Капиталовложения по годам строительства энергоблока распределяются равномерно.



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

2. Полезный годовой отпуск электроэнергии для всех лет эксплуатации установки принимается одинаковым и определяется из выражения

$$E_{\text{год}} = N_{\text{полезн}} h, \quad (1)$$

где  $N_{\text{полезн}}$  – полезная мощность энергоблока в расчетном режиме,  $h$  – годовое число часов использования полезной мощности.

3. Годовые топливные издержки для всех лет эксплуатации энергоблока принимаются одинаковыми и определяются из выражения

$$I_{\text{топ}}^{\text{год}} = B^{\text{час}} h C^{\text{топ}}, \quad (2)$$

где  $B^{\text{час}}$  – часовой расход топлива в расчетном режиме,  $C^{\text{топ}}$  – цена топлива, принимаемая для всех лет расчетного периода эксплуатации.

4. Ежегодные условно-постоянные эксплуатационные издержки  $I_{\text{уп}}^{\text{год}}$ , не зависящие от числа часов использования полезной мощности, и ежегодные амортизационные отчисления  $I_{\text{ам}}^{\text{год}}$  принимаются постоянными для всех лет расчетного периода и определяются из выражений

$$I_{\text{уп}}^{\text{год}} = K_{\text{уст}} \alpha_{\text{уп}}, \quad (3)$$

$$I_{ам}^{год} = K_{уст} \alpha_{ам}, \quad (4)$$

где  $K_{уст}$  – капиталовложения в установку,  $\alpha_{уп}$ ,  $\alpha_{ам}$  – доли годовых условно-постоянных издержек и амортизационных отчислений от  $K_{уст}$ .

При этих допущениях цена электроэнергии определяется из уравнения

$$\sum_{t=1}^{T_{стр}} \left[ \left( \frac{K_{уст}}{T_{стр}} \right) \left( \frac{1}{1+IRR} \right) \right]^{t-1} + \sum_{t=T_{стр}+1}^{T_{стр}+T_{экспл}} \left[ \left( I_{топ}^{год} + I_{уп}^{год} + I_{ам}^{год} - E_{год} C^{el} \right) \left( \frac{1}{1+IRR} \right) \right]^{t-1} = 0, \quad (5)$$

где  $T_{стр}$  – число лет строительства установки,  $T_{экспл}$  – число лет эксплуатации установки.

Цена электроэнергии  $C_{el}$ , при которой уравнение (5) выполняется, определяется из выражения

$$C_{el} = \frac{(K_{уст} G + I_{топ}^{уст} + I_{уп}^{уст} + I_{ам}^{уст})}{E_{год}}, \quad (6)$$

где

$$G = \frac{\sum_{t=1}^{T_{стр}} \left( \frac{1}{1+IRR} \right)^{t-1}}{T_{стр} \sum_{t=T_{стр}+1}^{T_{стр}+T_{экспл}} \left( \frac{1}{1+IRR} \right)^{t-1}}. \quad (7)$$

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 параметров 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 [15]:  $Q_i^r = 10048$  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 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 или воздуха, направляемых на сушку древесной биомассы, должна находиться в диапазоне 250–300°С, а давление пара в конденсаторе пентана не должно быть ниже атмосферного (что обеспечит отсутствие присосов воздуха в пентановый контур).

Стоимости турбин, насосов, дутьевых вентиляторов, дымососов определяются по удельным стоимостям их мощности, стоимость пароперегревателя, экономайзера, воздухоподогревателя, регенеративных подогревателей и других теплообменников – 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 дол./т у.т.

**Таблица 1.** Оптимальные характеристики установки, работающей по традиционному циклу Ренкина

Наименование	ПТУ без сушки		ПТУ с сушкой			
			газом		воздухом	
	1	2	1	2	1	2
	Критерии эффективности: 1 – максимум КПД нетто, 2 – минимум цены электроэнергии					
Расход топлива, кг/с	4.3	4.7	4.3	4.4	4.3	4.5
Температура воздуха на входе в топку, °С	271.9	115.9	215.8	105.9	297.2	250.4
Расход воздуха на входе в топку, кг/с	18.9	20.9	18.9	18.4	18.1	18.3
Расход воздуха на сушку топлива, кг/с	–	–	–	–	13.1	14.2
Температура воды на выходе из водяного экономайзера, °С	283	281	297	287	261	293
Расход острого пара, кг/с	15.8	16.0	16.1	16.1	16.4	16.7
Давление острого пара, МПа	6.6	6.4	8.1	7.1	7.6	7.5
Температура острого пара, °С	495	482	497	476	486	482
Давление пара на входе в конденсатор, МПа	0.003	0.003	0.006	0.0046	0.0046	0.0047
Температура воды на выходе из подогревателя низкого давления, °С	107	110	105	94	95	95
Температура воды на выходе из подогревателя высокого давления, °С	187	177	195	184	186	190
Температура газа на входе в сушку, °С	–	–	250	250	–	–
Температура уходящих газов, °С	102	201	113	122	84	98
Площадь теплообменной поверхности экономайзера, м <sup>2</sup>	1435.6	572.1	502.9	497.1	901.3	397.4
Площадь теплообменной поверхности пароперегревателя, м <sup>2</sup>	443.4	173.9	495.4	178.6	553.8	112.9
Площадь теплообменной поверхности воздухоподогревателя, м <sup>2</sup>	608.8	511.4	350.2	210.9	9821.5	7023.5
Площадь теплообменной поверхности подогревателя низкого давления, м <sup>2</sup>	30.4	31.7	28.8	29.2	29.5	29.9
Площадь теплообменной поверхности подогревателя высокого давления, м <sup>2</sup>	21.4	11.6	21.7	22.6	22.4	22.9
Мощность паровой турбины, МВт	16.2	16.3	16.2	16.5	16.3	16.5
Полезная мощность установки, МВт	15.8	15.9	15.7	16.0	15.7	16.0
КПД нетто, %	36.23	33.3	36.47	36.1	36.28	35.49
Капиталовложения, млн долл.	18.8	15.8	15.9	15.8	20.7	19.1
Удельный расход топлива, г у.т./кВт ч	339.1	368.9	336.9	339.7	339.5	346.8
Удельные капиталовложения, долл./кВт	1189.5	990.1	1019.7	986.2	1312.9	1194.1
Цена электроэнергии, цент/кВт ч	3.97	3.48	3.51	3.42	4.3	4.0

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты оптимизационных расчетов варианта с традиционным циклом Ренкина представлены в табл. 1. Как видно, оптимальным вариантом как по критерию энергетической, так и экономической эффективности является вариант с сушкой биомассы дымовыми газами. Для этого варианта 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.

Для вариантов с комбинированным циклом Ренкина и классическим ОЦР рассматривается только сушка биомассы дымовыми газами. Результаты оптимизации вариан-

**Таблица 2.** Оптимальные характеристики комбинированной установки с органическим циклом Ренкина

Наименование	ПТУ + ОЦР с сушкой	
	Критерии эффективности: 1 – максимум КПД нетто, 2 – минимум цены электроэнергии	
	1	2
Расход топлива, кг/с	4.4	4.9
Температура воздуха на входе в топку, °С	221.3	162.8
Расход воздуха на входе в топку, кг/с	19.4	21.7
Температура воды на выходе из водяного экономайзера, °С	284	290
Давление острого пара, МПа	6.7	7.4
Температура острого пара, °С	496	476
Расход острого пара, кг/с	17.4	18.7
Давление водяного пара на входе в испаритель пентана, МПа	0.14	0.25
Температура водяного пара на входе в испаритель пентана, °С	140.7	157.4
Температура воды на выходе из испарителя пентана, °С	111	116
Расход пара пентана на входе в турбину, кг/с	67.1	71.1
Давление пара пентана на входе в турбину, МПа	0.67	0.87
Температура пара пентана на входе в турбину, °С	105.6	118
Давление пара пентана на входе в конденсатор, МПа	0.126	0.125
Температура пара пентана на входе в конденсатор, °С	66	73
Расход воды на конденсатор пентана, кг/с	221.7	289.4
Температура газа на входе в сушку, °С	250	250
Температура уходящих газов, °С	98	114
Площадь теплообменной поверхности водяного экономайзера, м <sup>2</sup>	2035.6	577.2
Площадь теплообменной поверхности пароперегревателя, м <sup>2</sup>	581.3	194.8
Площадь теплообменной поверхности воздухоподогревателя, м <sup>2</sup>	1474.9	319.8
Площадь теплообменной поверхности испарителя пентана, м <sup>2</sup>	3877.1	1721.4
Площадь теплообменной поверхности конденсатора пентана, м <sup>2</sup>	1004.9	651.8
Мощность паровой турбины, МВт	12.14	11.98
Мощность турбины на пентане, МВт	3.58	4.56
Полезная мощность установки, МВт	15.28	15.98
КПД нетто, %	34.74	32.26
Капиталовложения, млн долл.	19.3	16.75
Удельный расход топлива, г у.т./кВт ч	353.7	380.8
Удельные капиталовложения, долл./кВт ч	1263.6	1047.8
Цена электроэнергии, цент/кВт ч	4.22	3.67

та с комбинированным циклом Ренкина представлены в табл. 2. Как видно, для этого варианта критерии эффективности несколько ниже, чем для установки, работающей по традиционному циклу Ренкина. Максимальный КПД нетто равен 34.74%, а минимальная цена электроэнергии – 3.67 цент/кВт ч. При этом давление острого пара ле-

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

Наименование	ОЦР с сушкой	
	Критерии эффективности: 1 – максимум КПД нетто, 2 – минимум цены электроэнергии	
	1	2
Расход топлива, кг/с	8.6	9.4
Температура воздуха на входе в топку, °С	91	101
Расход воздуха на входе в топку, кг/с	35.9	39.3
Температура термомасла на выходе из подогревателя № 2, °С	292	234
Давление термомасла на выходе из подогревателя № 1, МПа	0.42	0.64
Температура термомасла на выходе из подогревателя № 1, °С	363	344
Температура термомасла на выходе из испарителя пентана, °С	195	171
Расход термомасла, кг/с	189.6	237.7
Расход пентана, кг/с	189.9	209.2
Давление пара пентана на входе в турбину, МПа	1.67	1.82
Температура пара пентана на входе в турбину, °С	155	159
Давление пара пентана на входе в регенератор, МПа	0.13	0.14
Температура пара пентана на входе в регенератор, °С	89	91
Температура конденсата пентана на входе в регенератор, °С	35	44
Температура конденсата пентана на выходе из регенератора, °С	74	79
Давление пара пентана на входе в конденсатор, МПа	0.11	0.12
Температура пара пентана на входе в конденсатор, °С	42	47
Расход воды на конденсатор пентана, кг/с	633.9	602.5
Температура газа на входе в сушку, °С	250	250
Температура уходящих газов, °С	53	72
Площадь теплообменной поверхности подогревателя № 1, м <sup>2</sup>	1604.7	637.7
Площадь теплообменной поверхности подогревателя № 2, м <sup>2</sup>	2486.8	935.8
Площадь теплообменной поверхности воздухоподогревателя, м <sup>2</sup>	1849.3	891.5
Площадь теплообменной поверхности испарителя пентана, м <sup>2</sup>	1527.2	917.3
Площадь теплообменной поверхности регенератора пентана, м <sup>2</sup>	8897.8	4671.1
Площадь теплообменной поверхности конденсатора пентана, м <sup>2</sup>	1432.3	1175.9
Мощность турбины на пентане, МВт	16.16	16.99
Полезная мощность установки, МВт	15.0	15.65
КПД нетто, %	17.45	16.48
Капиталовложения, млн долл.	25.2	22.7
Удельный расход топлива, г у.т./кВт ч	704.1	745.3
Удельные капиталовложения, долл./кВт ч	1677.4	1462.4
Цена электроэнергии, цент/кВт ч	6.06	5.45

жит в диапазоне 6.69–7.38 МПа, а температура – в диапазоне 476–496°С. Давление водяного пара на входе в испаритель пентана лежит в диапазоне 0.147– 0.25 МПа. Давление пара пентана на входе в турбину лежит в диапазоне 0.67–0.87 МПа. Давление в конденсаторе пентана находится в пределах 0.125–0.126 МПа. Как показали результаты оптимизации, температура пара пентана после турбины лишь незначительно больше температуры насыщения при давлении в конденсаторе. Поэтому установка регенератора в пентановом цикле не предусмотрена.

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%, и значительно более высокую цену электроэнергии – 5.45–6.06 цент/кВт ч. При этом давление острого пара пентана лежит в диапазоне 1.67–1.82 МПа. Температура термомасла на выходе из котла составляет 344–363°C. Главная причина худших критериев эффективности данного варианта обусловлена низкой максимальной температурой рабочего тела, что приводит к низкому КПД и необходимости передавать большие тепловые потоки, для обеспечения той же полезной мощности, что и в двух ранее рассмотренных вариантах. При оптимальных давлениях пара на входе и выходе пентановой турбины имеет место превышение температуры выходного пара над температурой насыщения, поэтому в данной схеме целесообразна установка регенератора в пентановом цикле.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление результатов оптимизационных расчетов показывает:

1. Использование сушки древесной биомассы за счет тепла дымовых газов является более эффективным, чем сжигание сырого топлива или сушки за счет тепла горячего воздуха.

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

3. 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 пентановой турбины, по сравнению с ЦНД турбины на водяном паре, за счет значительно более высокого давления пентана на выходе из турбины.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tartière Thomas, Astolfi Marco.* A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market. *Energy Procedia.* 2017. V. 129. P. 2–9.
2. *Javanshir Alireza, Sarunac Nenad.* Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle. *Energy.* 2017. V. 118. P. 85–96.
3. *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.
4. *Astolfi M., Martelli E., Pierobon L.* 7–Thermodynamic and technoeconomic optimization of Organic Rankine Cycle systems. *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications.* 2017. P. 173–249.
5. *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.
6. *Gang Li.* 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.
7. *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.
8. *Гафуров А.М.* Возможности использования органического цикла Ренкина для утилизации низкопотенциальной теплоты // *Вестник Казанского государственного энергетического университета,* 2014. № 2(21). С. 20–25.
9. *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.

10. Методы оптимизации сложных теплоэнергетических установок / А.М. Клер, Н.П. Деканова, Т.П. Щеголева и др. Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма, 1993. 116 с.
11. Эффективные методы схемно-параметрической оптимизации сложных теплоэнергетических установок: разработка и применение / Под ред. А.М. Клера; Рос. акад. наук, Сиб. отделение, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2018. 210 с. ISBN 978-5-6041446-0-2.
12. [www.dow.com](http://www.dow.com)
13. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.
14. [http://www.coolprop.org/fluid\\_properties/fluids/index.html](http://www.coolprop.org/fluid_properties/fluids/index.html)
15. *Пугач Л.И.* Нетрадиционная энергетика – возобновляемые источники, использование биомассы, термохимическая подготовка, экологическая безопасность: учеб. пособие / Л.И. Пугач, Ф.А. Серант, Д.Ф. Серант. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 347 с.

### Optimization Studies of Power Plants on Wood Biomass with Organic Rankine Cycle

A. M. Kler<sup>a</sup>, A. Yu. Marinchenko<sup>a</sup>, Yu. M. Potanina<sup>a, \*</sup>, and P. V. Zharkov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ESI SB RAS), Irkutsk, Russia*

*\*e-mail: julia@isem.irk.ru*

The paper is devoted to optimization studies of wood biomass power plants operating on various options of the Rankine cycle. This is the "classic" organic Rankine cycle, when the boiler heats thermal oil, giving heat to the organic working fluid (pentane), whose steam expands in the turbine; "traditional" Rankine cycle on water and water vapor and the combined cycle, when superheated water vapor is obtained in the boiler, which, after expansion in the turbine, enters the evaporator of the organic working fluid, the vapor of which expands in the "pentane" turbine. Since wood biomass (logging and woodworking wastes), as a rule, have high humidity, options for its preliminary drying with exhaust gases or hot air, as well as the option without drying, with the supply of raw wood biomass to the boiler furnace, are considered. 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 studies performed allowed us to assess the energy and economic efficiency of the compared options.

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

The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 18-08-01068 a.