

На правах рукописи



Карабарин Денис Игоревич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ
НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК**

05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2021

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор **Михайленко Сергей Ананьевич**;
доктор технических наук, профессор **Кулагин Владимир Алексеевич**.

Официальные оппоненты:

Кузнецов Гений Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Научно-образовательный центр И. Н. Бутакова, профессор;

Кудряшов Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра теплоэнергетики, доцент.

Ведущая организация – **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет»**

Защита состоится «12» февраля 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. Г34-14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан __ января 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности и ресурсосбережения путем внедрения рациональной утилизации низко-потенциальной, «сбросной» теплоты на примере действующих объектов энергетики и промышленности Красноярского края.

Развитие энергетики России в условиях рыночной экономики сопровождается ужесточением требований к потерям при производстве и потреблении энергии, а также вредным выбросам в окружающую среду. Согласно федеральному закону «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 03.08.2018) генерирующие предприятия должны принять меры по эффективному и рациональному использованию энергетических ресурсов с учетом ресурсных, производственно-технологических, экологических и социальных условий.

Энергосберегающие технологии производства с утилизацией сбросной тепловой энергии широко используются в крупных технологических странах: Китае, США, Японии, Италии, Германии и др. Мировой опыт показывает рентабельность внедрения утилизации для теплоты уходящих газов от ГТУ, биогазовой и геотермальной энергетики. В последние годы набирает популярность использование энергосберегающих технологий на основе органического цикла Ренкина (ОЦР) в России (строительство станции компанией «Лукойл» в Перми, станций компанией «Ultralam» в Тверской области, объекты ПАО «Газпром») с суммарной величиной располагаемой тепловой мощности более 92 ГВт. Развитие и адаптация энергосберегающих технологий к Российским реалиям требует научного обеспечения.

Одним из определяющих факторов эффективного внедрения утилизации на тепло-технологических объектах является нахождение рациональных конструктивных характеристик и компоновочных решений установок органического цикла Ренкина, обеспечивающих высокую эффективность, надежность эксплуатации и полноту утилизации.

Повышение эффективности получения энергии от низко-потенциальных источников теплоты является актуальной задачей, решение которой позволит не только выполнить требования федерального закона, а также производить энергию без первичных энергоресурсов.

Степень разработанности темы. Исследованию повышения эффективности производства энергии за счет утилизации низко-потенциальной энергии с использованием органического цикла Ренкина на тепло-технологических объектах энергетики, тяжелой и легкой промышленности посвящены работы авторов А.И. Богданова, В.В. Гетмана, А.В. Разношинской, А.И. Рыбалко, О.А. Колунова, М.В. Лобана, Ю.А. Антипова, А.А. Сухих, А.П. Марченко, В.В. Шуховцева, Е.В. Джураева, М.Б. Сапожникова, Г.В. Кузнецова, Si-Cong Yu., Aneke M., Bianchi M., Quoilin S., Galloni E. и др. Большинство работ посвящено разработке технологии для утилизации теплоты уходящих газов от технологического источника без учета влияния типа расширителя, температуры испарения, конфигурации установки, а также рынка хладагентов в России, влияющего на техническую и экономическую составляющую проекта. Используется ряд технологических решений, позволяющих утилизировать низко-потенциальную теплоту ($< 350\text{ }^{\circ}\text{C}$), среди которых выделяется ОЦР. Проведенный анализ выполненных исследований показал их теоретическую недостаточность в вопросах выбора технологической схемы ОЦР, температуры испарения и рабочего тела для внедрения на тепло-технологических объектах.

Работа выполнена в рамках приоритетного направления развития науки, технологий и техники РФ Пр–577 «Энергосберегающие технологии», критические технологии «Системы жизнеобеспечения и защиты человека», «Энергосбережение».

Объект исследований – энергетические установки на предприятиях промышленной энергетики.

Предмет исследований – характеристики технологии утилизации теплоты на основе ОЦР.

Цель работы – повышение энергетической эффективности тепло-технологических установок путем использования (преобразования) низкопотенциальной «сбросной» теплоты за счет совершенствования технологии на основе органического цикла Ренкина.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Проведен анализ развития технологий использования низкопотенциальной энергии промышленных и энергетических объектов;
2. Разработана методика оценки энергетической эффективности утилизации с учетом особенностей технологии ОЦР;
3. Произведено моделирование термодинамических процессов утилизации теплоты уходящих газов на тепло-технологических объектах.
4. Экспериментально исследованы термодинамические процессы в опытно-промышленной установке ОЦР на 4 кВт.
5. Разработаны рекомендации по совершенствованию конструкции установок ОЦР, обеспечивающие надежность и безопасность протекающих термодинамических процессов.

Методология и методы исследования. Экспериментальные исследования проводились на опытно-промышленной установке с применением стандартных сертифицированных средств измерения. Определение термодинамических параметров проводилось с использованием разработанной компьютерной модели термодинамических процессов, построенной на базе лицензионного программного продукта SmoWeb.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствована методика определения рабочего тела для технологии ОЦР – предложен критерий, позволяющий определить минимальную температуру насыщения рабочего тела, необходимую для полной утилизации теплоты.
2. Предложена модель термодинамических процессов в установках ОЦР, система уравнений и краевые условия, учитывающие конфигурацию ОЦР, выбор типа утилизации теплоты, влияние температуры испарения и типа расширителя на эффективность и полноту утилизации. Показано, что модель адекватно отражает результаты экспериментальных исследований.
3. Установлены количественные зависимости влияния термодинамических параметров на эффективность работы системы ОЦР с рабочим телом R142b – определены: зависимость эффективности ОЦР от температур: греющей среды, холодного источника, испарения и конденсации и оптимальная температура испарения с учетом полноты утилизации и эффективности ОЦР.

Значение для теории. Предложена методика определения энергетических и экономических показателей утилизации теплоты на энергетических и промышленных объектах с учетом найденного критерия, позволяющего определить минимальную температуру насыщения рабочего тела, необходимую для полной утилизации теплоты.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке схемы осуществления утилизации (преобразования) низко потенциальной теплоты на тепло-технологических объектах, учитывающие тип утилизации и особенности технологии ОЦР. Для инженерной практики разработана методика оценки технико-экономического эффекта от внедрения установок ОЦР различной конфигурации на предприятиях цветной металлургии и промышленной энергетики. Разработаны режимы работы и рациональная конструкция установки ОЦР, работающей на рабочем теле R142b, позволяющие получить дополнительную энергетическую мощность при утилизации теплоты на тепло-технологических объектах.

Использование полученных результатов. Научные и практические результаты работы используются в Сибирском федеральном университете при подготовке студентов по направлениям: Теплоэнергетика и теплотехника и Техносферная безопасность в бакалаврских и магистерских программах «Энергетика теплотехнологий» и «Промышленная теплоэнергетика» в курсах дисциплин «Основы инженерной деятельности (проектная деятельность)», а также в научно-исследовательской деятельности ПИ СФУ.

Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов расчета термодинамических параметров в программном продукте SmoWeb с экспериментальными данными в ходе апробации расчётных моделей. Выводы достаточно хорошо коррелируют с результатами, полученными другими исследователями, и не противоречат физическим закономерностям в смежных областях знаний.

Личный вклад автора. Автору принадлежат: формализация поставленных задач, обобщение, анализ результатов. Положения, составляющие новизну, научные и практические результаты диссертации разработаны и получены автором лично. Постановка задач и анализ результатов обсуждались совместно с научным руководителем. В совместных публикациях вклад автора составляет от 50 до 75 %.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны» посвященной 70-летию великой победы (Красноярск, 2014–17 гг.); Конкурсе «Лучший проект в сфере энергосбережения, энергоэффективности и возобновляемых источников энергии и биотоплива» в рамках V Международного форума ENES 2016 (Москва, 2016); Региональном туре «GenerationS» (Красноярск, 2016); XI Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2017), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Красноярск, 2018).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 12 научных работ, из них: три статьи в журналах из Перечня ВАК; три статьи в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science; одна статья в сборнике научных трудов; пять статей в материалах научных конференций различного уровня.

Структура и объем работы. Материалы диссертации изложены на 155 страницах основного текста, включающего, 60 рисунков и 12 таблиц. Работа состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и рекомендаций, списка литературы из 132 наименований и приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, основные решаемые задачи, представлены научная новизна и положения, выносимые на защиту, отражены теоретическая и практическая значимость полученных результатов, методология и методы исследования, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе представлен анализ современных технологий утилизации тепловой энергии. Проанализированы схемы включения установок, утилизирующих уходящую теплоту на объектах промышленности и энергетики Красноярского края.

На основе проведенного обзора отечественных и зарубежных источников отмечено, что потенциал утилизации теплоты может повысить энергоэффективность производства энергии на 10–50 % в зависимости от скорости потока, температуры, давления, химического состава, допустимой температуры и допустимого падения давления источника теплоты.

Показано, что для утилизации (преобразования) низкопотенциальной теплоты широко используют: ОЦР, цикл Калины, термоэлектрические преобразователи, двигатель Стирлинга. При этом наибольший потенциал для применения на энергетических и промышленных объектах демонстрирует технология органического цикла Ренкина

Анализ вариантов включения технологии ОЦР на объектах промышленности и энергетики Красноярского края показал, что:

1. Основные источники низкопотенциальной энергии – это уходящие газы преимущественно от трех источников: технологические промышленные установки, котельные, тепловые электрические станции.

2. Способы включения утилизационного цикла в схему преобразования низкопотенциальной теплоты отличаются температурой, до которой можно охладить газы. Помимо традиционной утилизации теплоты уходящих газов до температуры выше точки росы, существует глубокая утилизация, при которой происходит конденсация водяных паров, содержащихся в газах.

3. Способы включения установок ОЦР в схему утилизации отличаются наличием теплообменника (регенератора). Так как в процессе расширения рабочее тело находится в состоянии перегретого пара, в схему установки включают теплообменник для передачи этой теплоты жидкой фазе. Данный способ включения называется регенеративным ОЦР.

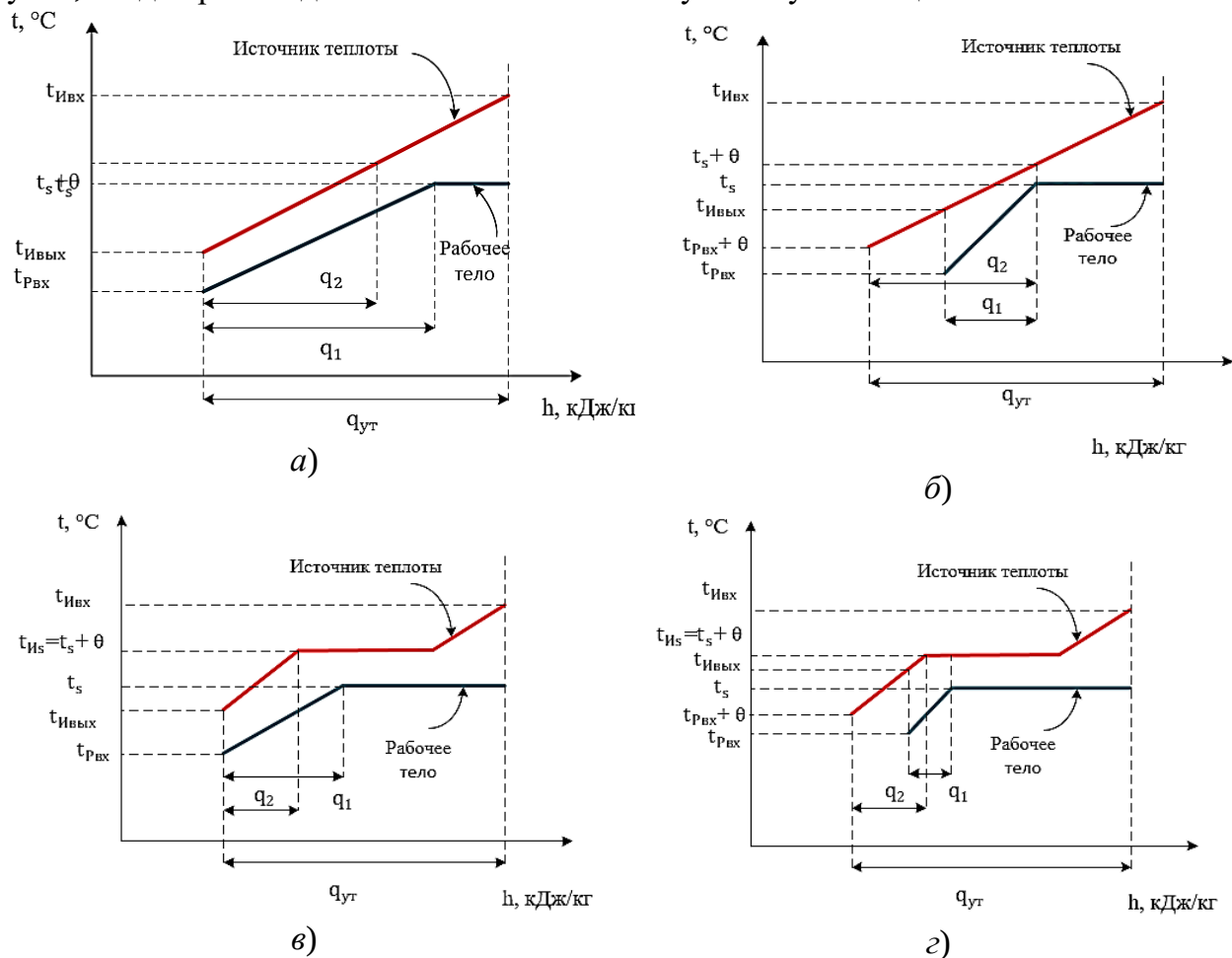
4. Для утилизации теплоты уходящих газов возможно четыре варианта осуществления утилизации: глубокая утилизация с ОЦР без регенерации и с регенеративным ОЦР; утилизация с ОЦР без регенерации и с регенеративным ОЦР.

5. Для котельных и тепловых электрических станций помимо утилизации тепла уходящих газов возможно преобразование низко-потенциальной теплофикационной энергии сетевой воды или пара теплофикационного отбора.

На основе проведенного обзора отечественных и зарубежных источников отмечено, что степень влияния параметров источника теплоты, конфигурация и состав компонентов установок ОЦР, а также режимов работы изучены недостаточно, поэтому разработка их рациональных конструкций и промышленное внедрение встречает значительные трудности. Следовательно, исследования, направленные на повышение энергоэффективности и ресурсосбережения путем внедрения рациональной утилизации низко-потенциальной, «сбросной» теплоты представляются актуальными.

В результате анализа имеющихся литературных источников определены основные задачи диссертационного исследования.

Производители установок ОЦР используют различные рабочие жидкости, тепловые двигатели и температуры испарения в зависимости от мощности, температуры и среды источника тепла. Доказано что наибольшей эффективностью обладают рабочие жидкости с положительной пограничной кривой («сухие» жидкости), которые после расширения имеют степень сухости равную единице. Для рассматриваемых источников теплоты был произведен подбор рабочего тела и температуры испарения, представлена математическая модель подбора.



Когда температура насыщения больше предельной, теплота источника не используется. Это связано с тем что теплота (q_2), отдаваемая газами при охлаждении от температуры ($t_s + \Delta$) до ($t_{\text{ИВЫХ}}$) больше теплоты необходимой для нагрева рабочего тела до температуры испарения (q_1).

На положение начала кривой насыщения влияют температура рабочей жидкости на входе ($t_{\text{РВХ}}$), температура источника тепла ($t_{\text{ИВХ}}$), скрытая теплота парообразования (r), удельная теплота подогрева до состояния насыщения (Δh), недогрева между средами (Δ). При этом коэффициент теплопередачи не оказывает влияния на положение точки вскипания. Полная утилизация теплоты происходит, когда удельная теплота подогрева до состояния насыщения становится больше или равна теплоте, отдаваемой газами. Алгебраически данное утверждение можно записать через определитель (ОПР):

$$\text{ОПР} = \frac{\frac{\Delta h \cdot C_p \cdot (t_{\text{ИВХ}} - (t_{\text{исп}} + \Delta))}{r} - C_p \cdot (t_{\text{исп}} - t_{\text{РВХ}})}{\Delta h + r} \quad (1)$$

При внедрении глубокой утилизации процесс передачи теплоты от источника теплоты состоит из трех процессов: охлаждение газов до температуры точки росы ($\Delta h_{\text{п}}$), конденсация водяных паров из уходящих газов ($r_{\text{конд}}$), содержащихся в уходящих газах и охлаждение газов ниже температуры точки росы (Δh_o). Определитель для такого случая определяется как:

$$\text{ОПР} = \frac{\frac{\Delta h_{\text{п}} \cdot (C_p \cdot (t_{\text{ИВХ}} - (t_s + \Delta)) + r_{\text{конд}})}{r} - C_p \cdot (t_s - (t_{\text{РВХ}} + \Delta))}{\Delta h + r} \quad (2)$$

Скрытая теплота парообразования и удельная теплота подогрева до состояния насыщения находятся с помощью программы SmoWeb. Скрытая теплота парообразования определяется как разница энтальпий при постоянном давлении с изменением степени сухости от 0 до 1. Удельная теплота подогрева рассчитывается как разница энтальпии насыщенной жидкости и энтальпии после насоса.

Когда значение ОПР > 0 , температура насыщения достигает максимума, при этом утилизируется вся теплота. Когда значение ОПР < 0 , температура насыщения меньше, чем требуемая для полной утилизации. Используя определитель количество утилизируемой теплоты определяется как:

$$q_{\text{ут}} = C_p \cdot (\text{ОПР} + t_{\text{ИВХ}} - (t_{\text{РВХ}} + \Delta)) \quad (3)$$

Когда значение ОПР равно 0, температура насыщения становится равной предельной, наклон кривой источника теплоты и кривой рабочей жидкости совпадают, что редко происходит на практике.

Когда значение ОПР отрицательно, утилизируемая теплота становится меньше максимально возможной. Чем больше значение ОПР, тем больше тепла восстанавливается. Выражение для ОПР точно определяет температуру испарения, и также является показателем количества восстанавливаемого тепла.

Поскольку при удельных температурах испарения и конденсации термическая эффективность различных рабочих жидкостей весьма схожая, рабочая жидкость, которая восстанавливает больше теплоты, производит большую мощность. При определенной температуре испарения, если имеются рабочие жидкости, у которых

положительные значения ОПР, выбирается рабочая жидкость с наивысшим тепловым КПД. Тепловая эффективность незначительно увеличивается с критической температурой рабочих жидкостей. Положительное значение ОПР указывает, что температура кипения меньше предельной, и отработанное тепло может быть полностью восстановлено. Выбирая рабочую жидкость с максимальной эффективностью, получают максимальную выходную мощность. Если значения ОПР для всех предварительно выбранных рабочих жидкостей меньше 0, то температура кипения больше предельной для всех рабочих жидкостей, а теплота не может быть полностью восстановлена. Это означает, что рабочая жидкость с максимальным значением ОПР должна выбираться как оптимальная рабочая жидкость при определенной температуре испарения.

Таким образом ОПР – это всеобъемлющий показатель производительности системы с учетом всех важных параметров ОЦР. Он одновременно учитывает характеристики рабочего тела и условия работы. На основе ОПР предлагается новый метод выбора рабочей жидкости и условий работы одновременно.

Расчет выбора рабочего тела для температуры источника тепла 120 °С и температуры конденсации 40 °С для рабочих жидкостей с массовым расходом 1 кг/с, доступных в России представлен в таблицах 1 и 2. Как показывают расчеты, ОПР становится положительным при температуре испарения 90 °С для фреона R142b.

Таблица 1 – Расчет параметров утилизации рассмотренных рабочих тел при температуре испарения 105 °С

Марка рабочего тела	$T_{\text{исп}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta h, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$r, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	ОПР	$q_{\text{ут}}, \text{кВт/кг}$	$P, \text{кВт/кг}$	$Q_{\text{max}}, \%$
R134a	105						
R227EA	105						
R142b	105	116,44	106,58	-1,174	37,3	3,731	12,71
R141b	105	177,94	87,14	-1,007	30,2	3,016	10,33
R290	105						
R600a	105	184,37	203,10	-0,667	40,1	4,009	13,67
R12	105	32,13	92,59	-1,850	52,6	5,257	17,93
R152	105	243,88	168,3	-0,965	48,1	4,807	16,39
R245fa	105	116,44	106,58	-1,151	36,2	3,617	12,34

Таблица 2 – Расчет параметров утилизации рассмотренных рабочих тел при температуре испарения 90 °С

Марка рабочего тела	$T_{\text{исп}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta h, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$r, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	ОПР	$q_{\text{ут}}, \text{кВт/кг}$	$P, \text{кВт/кг}$	$Q_{\text{max}}, \%$
R134a	90	82,48	86,51	-0,8	163,7	16,4	55,81
R227EA	90	53,34	69,61	-1,2	148,0	14,8	50,46
R142b	90	191,25	61,13	0,2	293,3	31,4	100
R141b	90	144,66	73,03	-0,2	249,8	25,0	85,16
R290 Propane)	90	132,76	176,56	-0,5	146,8	14,7	50,05
R600a	90	233,33	138,25	-0,2	225,2	22,5	76,76
R12	90	181,44	69,68	0,1	293,3	29,3	100
R152	90	164,28	106,20	-0,3	213,4	21,3	72,75
R245fa	90	180,2	61,13	0,2	293,3	30,8	100

Как видно из таблицы 2 три рабочих тела имеют положительный ОЦР. Для выбора рабочего тела эти три фреона анализируются по экономическим и экологическим показателям (таблица 3) Видно, что самым оптимальным рабочим телом для данных условий является фреон R142b с температурой насыщения 92 °С. Эти данные были приняты для расчета ОЦР.

Таблица 3 – Экологические и энергетические характеристики рабочих жидкостей с наилучшими показателями

Показатель	R142b	R12	R245fa
Химическая формула	Дифторэтан C2F2CLH3	Дифтордихлорметан CF2Cl2	Гидрофторуглерод HFC
Озон разрушающий потенциал (ODP)	0,065	0,9	0,082
Потенциал глобального потепления (GWP)	2000	8500	1300
Класс опасности	3	4	3
Температура самовоспламенения, °С	590	330	567
Предельная температура насыщения, °С	92	91	91
Удельная мощность при предельной температуре насыщения, кВт/кг	31,412	29,3	30,802

В качестве теплового двигателя, для получения полезной энергии, в технологии ОЦР используются расширители. Сравнительная оценка различных видов расширителей показывает, что спиральные и винтовые расширители выдерживают двухфазное расширение и имеют более низкие потери на утечки и на трение по сравнению с лопастными расширителями.

Таким образом для создания опытно-промышленного образца и оценки технико-экономического эффекта от внедрения утилизации теплоты на тепло технологических объектах, была принята температура испарения 92 °С и спиральный расширитель, использующийся в качестве теплового двигателя.

В третьей главе приводится описание опытно-промышленной установки, методика проведения и результаты экспериментальных исследований.

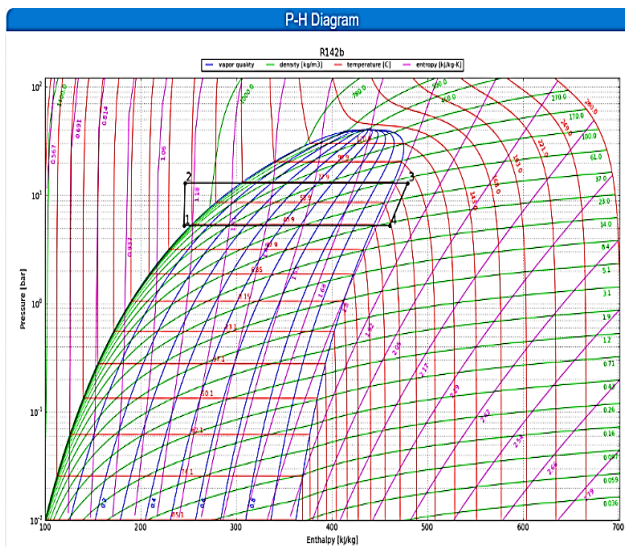
Для проведения экспериментальных исследований термодинамических процессов при различных температурах источника теплоты разработана установка, принципиальная схема которой представлена на рисунке 2. Установка состоит из контура подачи тепловой энергии, контура ОЦР с фреоном R142b и контура охлаждения. Исследование термодинамических процессов проводились в испарителе, расширителе и конденсаторе. В качестве испарителя и конденсатора использовались пластинчатые теплообменники «РИДАН» требуемой площади. В качестве расширителя использовался спиральный компрессор с электромагнитной муфтой способный работать в обратном направлении с заменой уплотнений на полиуретановые. В качестве питательного насоса использовался консольный насос Pedrollo. Подвод теплоты осуществлялся с помощью

электрокотла Zota с диапазоном нагрузки 15–40 кВт. Отвод энергии одушевлялся с помощью вентиля торной градирни ГРД.

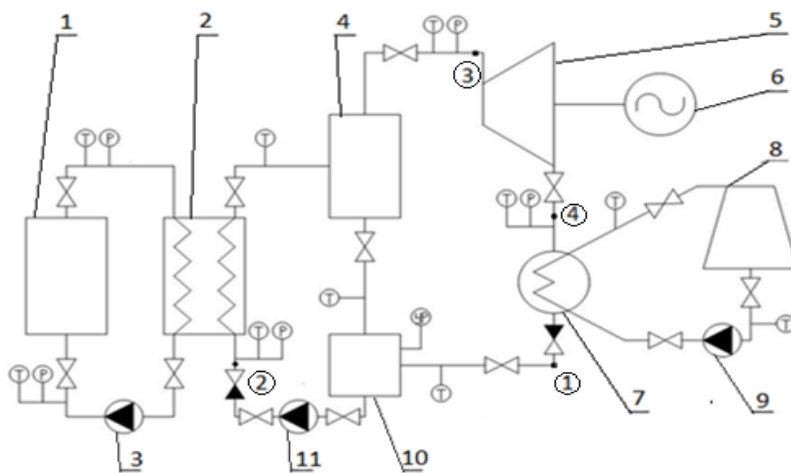
Для повышения надежности и безопасности работы установки в нее введены два дополнительных элемента сепаратор и ресивер, как бак запаса рабочего тела для пуска и останова, а также элементом, через который производится заполнение установки. Сепаратор служит для удаления жидкой фазы из паров фреона после исправителя и увеличения срока службы расширителя. Цикл «испаритель-сепаратор-ресивер-питательный насос» является пусковым, как только температура насыщения фреона становится равной оптимальной он поступает на расширитель.



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Схема опытно-промышленной установки ОЦР на 4 кВт; рабочее тело – фреон R142b: а – общий вид установки; б – $p-h$ диаграмма термодинамических процессов для фреона R142b; в – технологическая схема установки ОЦР с КИПиА: 1 – источник тепловой энергии, 2 – испаритель, 3 – подающий насос, 4 – сепаратор, 5 – расширитель, 6 – электрогенератор, 7 – конденсатор, 8 – градирня, 9 – циркуляционный насос, 10 – ресивер, 11 – питательный насос. Цифры в кружках – точки на диаграмме (рисунок 2 б)

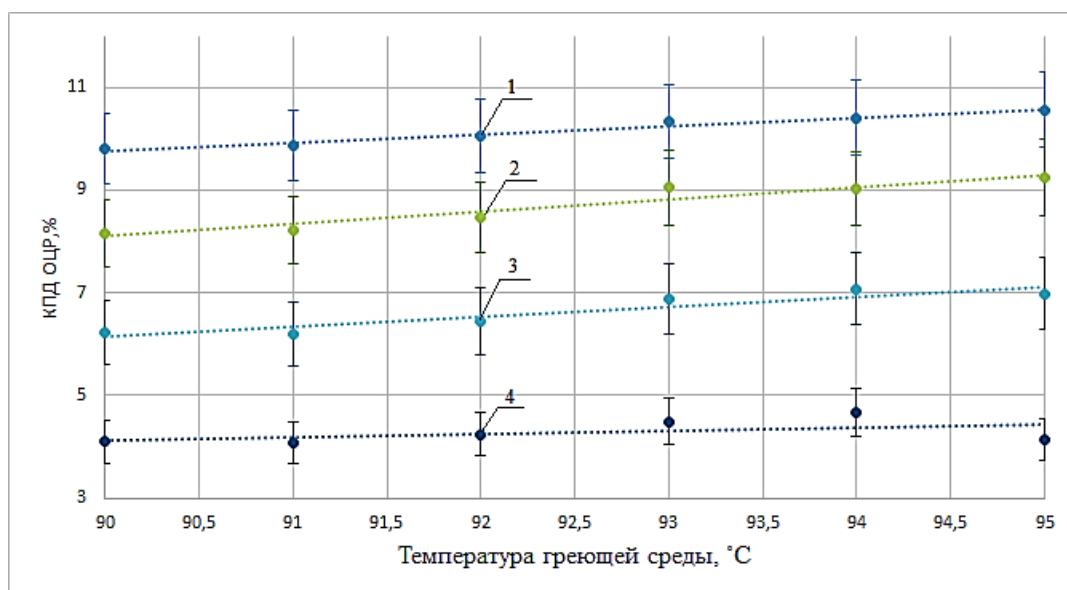


Рисунок 3 – Зависимость эффективности ОЦР от температуры греющей среды и тепловой нагрузки: 1 – нагрузка 100 %; 2 – 80 %; 3 – 60 %; 4 – 40 %.

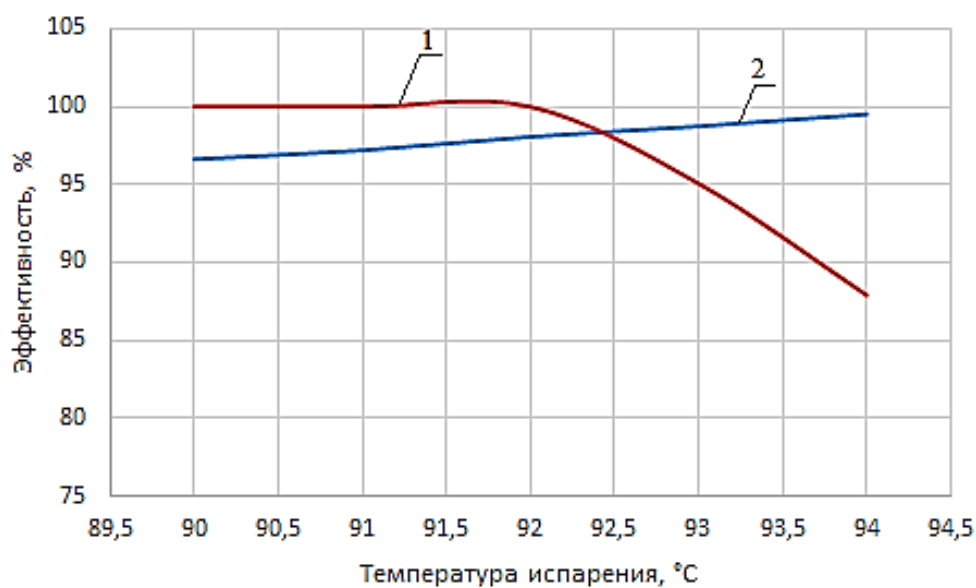


Рисунок 4 – Выбор оптимальной температуры испарения фреона R142b: 1 – зависимость доли преобразования теплоты от температуры испарения; 2 – зависимость относительного КПД ОЦР от температуры испарения

На рисунке 3 приведены зависимости эффективности ОЦР, использующей в качестве рабочего тела фреон R142b от температуры греющей среды при различных нагрузках установки. Анализ графиков показал, что зависимость КПД от нагрузки линейная причем при нагрузке менее 50 % угол наклона уменьшается, а при нагрузке менее 30 % установка перестает работать. Это объясняется принципом работы турбины (расширителя) диапазон нагрузки работы которого 30–120 %.

Установлено что количество преобразовываемой установкой теплоты зависит от температуры испарения (насыщения) рабочего тела. Для фреона R142b минимальная

температура, при которой осуществляется полная утилизация составляет 92 °С, а оптимальная, при которой с ростом температуры насыщения растет эффективность преобразования энергии и мощности, составляет 92,3 °С, рисунок 4.

На рисунках 5 и 6 представлено сравнение экспериментальных показателей энергетической эффективности с теоретическими. Видно, что относительная погрешность, найденная с помощью методики оценки ошибок измерений, между результатами моделирования *теоретических* показателей эффективности, определенных с помощью программного продукта SmoWeb и *экспериментальными*, определёнными с помощью показаний измерительных приборов на установке ОЦР находится в пределах допустимой и составляет 5 %.

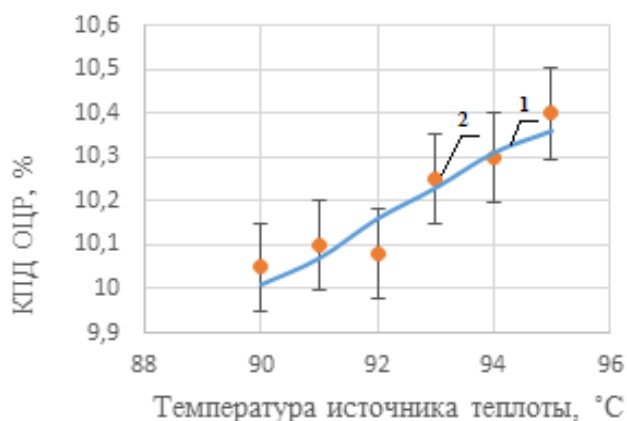


Рисунок 5 – Зависимость эффективности ОЦР от температуры источника теплоты:
1 – теоретические значения;
2 – экспериментальные точки

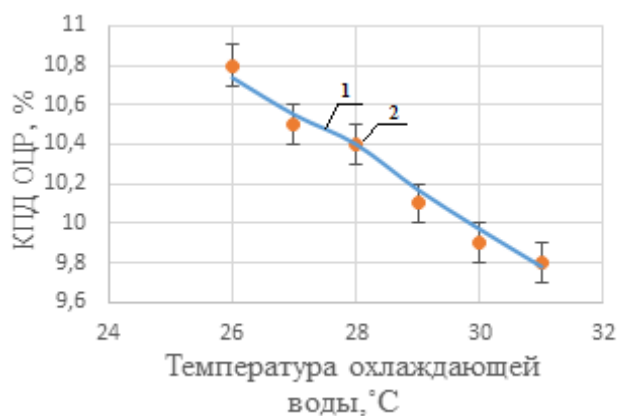
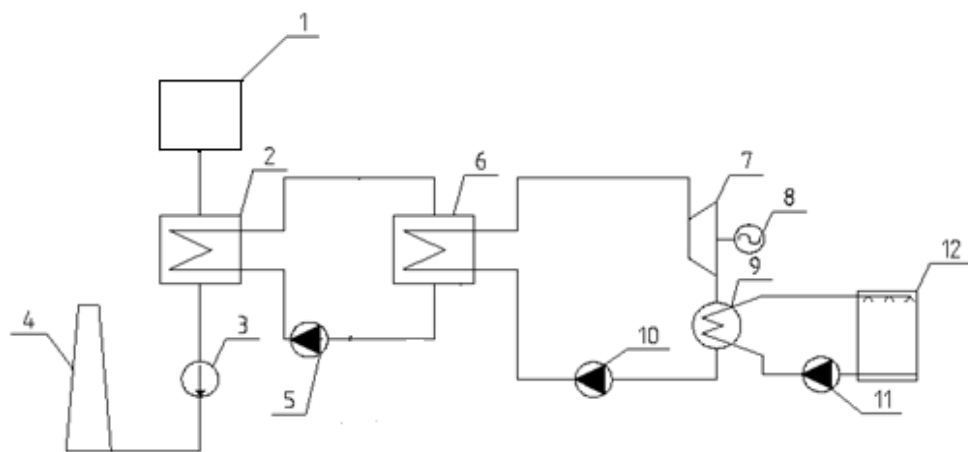
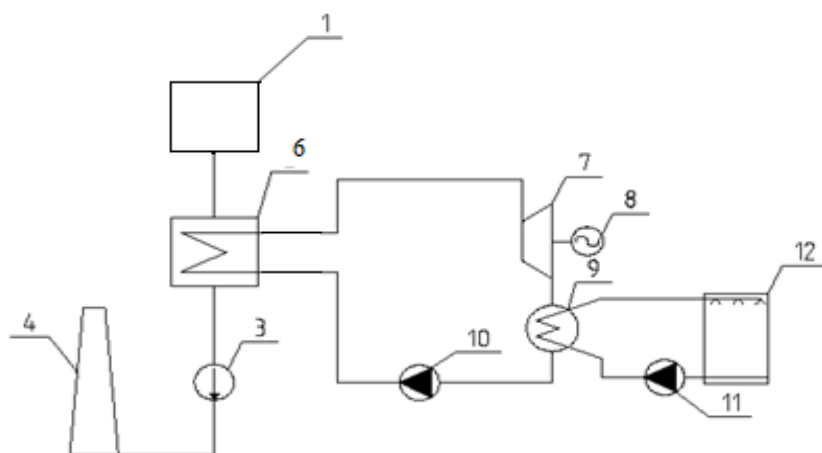


Рисунок 6 – Зависимость эффективности ОЦР от температуры охлаждающей воды:
1 – теоретические значения;
2 – экспериментальные точки

В четверной главе представлено технико-экономическое сравнение прямого включения утилизации сбросной теплоты с технологией ОЦР и включения утилизации через промежуточный греющий водяной контур, рисунок 7. Показано что при прямом включении тепловая мощность утилизации больше, чем через промежуточный водяной контур (менее 2 %), но при этом возрастают затраты: на прочностную защиту испарителя устанавливаемого в шахту котла (из-за наличия твердых частиц в уходящих газах); на регулирование температуры насыщения рабочего тела (т.к. температура греющих газов и давление после технологического производства меняется во время эксплуатации, следовательно, меняется и ОПР); на эксплуатацию и ремонт. Наличие промежуточного водяного контура позволяет распределять утилизируемую теплоту на электрическую и тепловую мощность, в зависимости от нужд тепло-технологического объекта. Техничко-экономическое сравнение этих вариантов показывают примерно одинаковый эффект, но учитывая преимущества и недостатки вариант с промежуточным контуром является более рациональным.



а)



б)

Рисунок 7 – Схема включения утилизации с технологией ОЦР на тепло-технологические объекты: а – включение утилизации с промежуточным греющим водяным контуром; б – прямое включение утилизации: 1 – технологическая схема объекта внедрения утилизации, 2 – рекуператор, 3 – дымосос, 4 – дымовая труба, 5 – сетевой насос, 6 – испаритель, 7 – турбина, 8 – генератор, 9 – конденсатор, 10 – питательный насос, 11 – циркуляционный насос, 12 – градирня

В данной работе использование ОЦР произведено применительно к различным технологическим процессам и производствам в промышленной теплоэнергетике и металлургии:

- утилизация теплоты анодных газов от электролизера на Красноярском алюминиевом заводе;
 - утилизация теплоты уходящих газов или преобразование энергии сетевой воды от котлов КВр-1,28 и КВа-3 на СЦТ-3 в п. Шапкино;
 - утилизация теплоты уходящих газов или преобразование энергии сетевой воды от котлов ДКВР-20/13 и КУ 25/14 на СЦТ-22 в д. Подтесово;
- утилизация теплоты уходящих газов от котла БКЗ-420-140-ПТ1 или преобразование энергии теплофикационного отбора на Красноярской ТЭЦ-2. В таблице 4

представлены варианты включения различных конфигураций ОЦР на тепло-технологических объектах

Таблица 4 – Варианты включения различных конфигураций ОЦР на тепло-технологических объектах

Тип включения	КрАЗ	СЦТ-3	СЦТ-22	ТЭЦ-2
Утилизация. с ОЦР без регенерации	•	•	•	•
Утилизация с регенеративным ОЦР	•	•	•	•
Глубокая утилизация с ОЦР без регенерации	•	•	•	•
Глубокая утилизация с регенеративным ОЦР	•	•	•	•
Преобразование воды с ОЦР без регенерации		•	•	•
Преобразование воды с регенеративным ОЦР		•	•	•
Преобразование пара с ОЦР без регенерации				•
Преобразование пара с регенеративным ОЦР				•

Технико-экономический анализ показал, что наиболее эффективным вариантом включения ОЦР в схему КрАЗа является конфигурация с глубокой утилизацией и без регенерации, рисунок 8. В данной схеме анодные газы отдают свою теплоту контуру греющей воды, который в свою очередь является источником теплоты для ОЦР. Помимо утилизации теплоты данный способ утилизации позволяет уменьшить затраты электроэнергии на дымосос за счет уменьшения температуры газов и их объема. Экономия топлива для такого способа составляет 427,1 т.у.т./год.

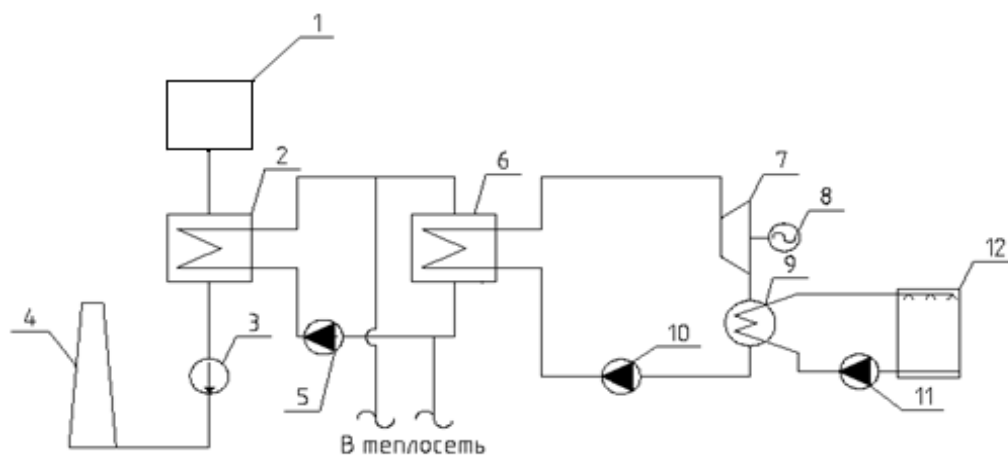


Рисунок 8 – Общая схема глубокой утилизации с ОЦР без регенерации: 1 – технологическая схема КрАЗа, 2 – рекуператор, 3 – вытяжной вентилятор, 4 – дымовая труба, 5 – сетевой насос, 6 – испаритель, 7 – турбина, 8 – генератор, 9 – конденсатор, 10 – питательный насос, 11 – циркуляционный насос, 12 – градирня

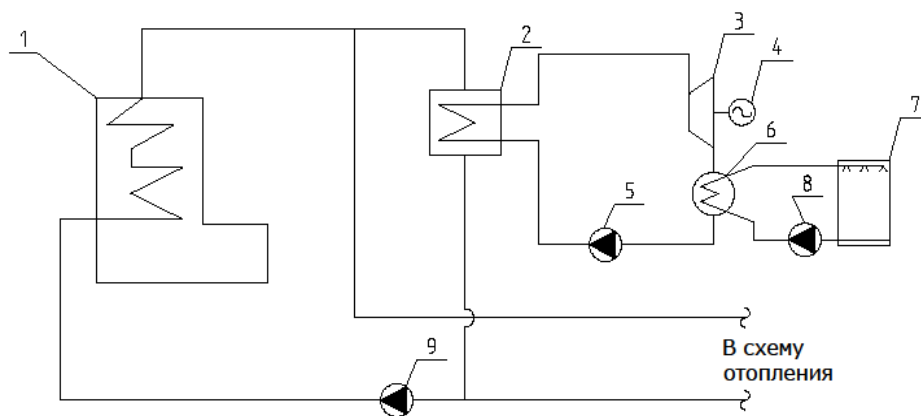


Рисунок 9 – Схема включения ОЦР с преобразованием тепловой энергии сетевой воды:
1 – котел, 2 – рекуператор, 3 – турбина, 4 – электрогенератор, 5 – питательный насос, 6 – конденсатор, 7 – градирня, 8 – циркуляционный насос, 9 – сетевой насос

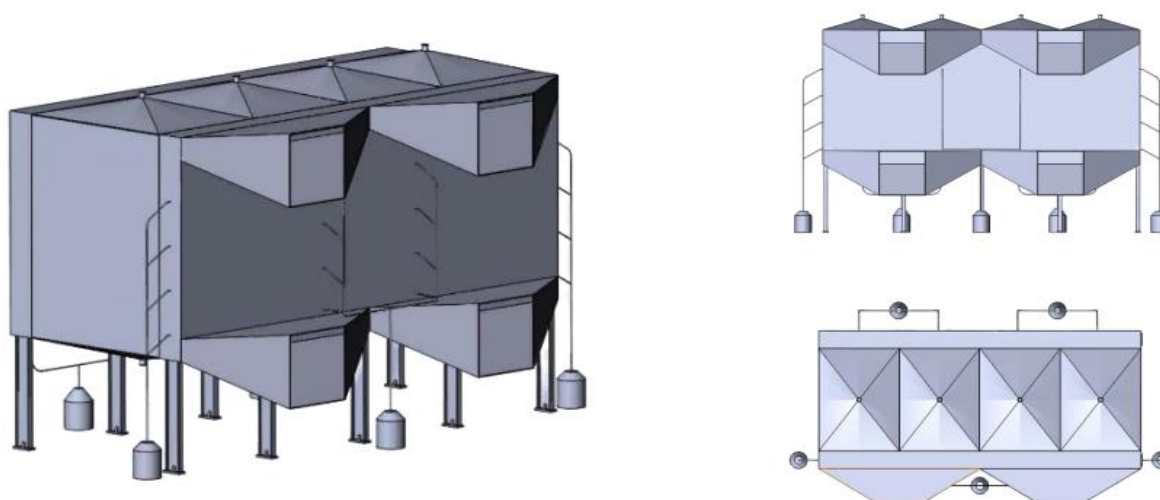


Рисунок 10 – Конструкция рекуператора теплоты

При утилизации теплоты уходящих газов или преобразования теплоты горячей воды на СЦТ все варианты включения ОЦР оказались рентабельны. Это объясняется высоким тарифами на энергию в рассматриваемых районах. Однако самыми привлекательными оказались варианты с включением глубокой утилизации и ОЦР без регенерации и преобразование избыточной тепловой энергии сетевой воды с ОЦР без регенерации, рисунок 9. Экономия топлива при таких способах составляет 82,4 и 3334,3 т.у.т./год для разных объектов. Наиболее эффективным вариантом утилизации теплоты уходящих газов или преобразования теплоты теплофикационного отбора на Красноярской ТЭЦ-2 является включение утилизации с ОЦР без регенерации. Экономия топлива при таком способе составляет 2372 т.у.т./год. На рисунке 10 представлена конструкция рекуператора теплоты для варианта включения утилизации на Красноярской ТЭЦ-2.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Усовершенствована методика определения рабочего тела для технологии ОЦР – предложен критерий, позволяющий определить минимальную температуру насыщения рабочего тела, необходимую для полной утилизации теплоты, учитывающая конструктивные и режимные особенности энергетических установок, что обеспечивает адекватную оценку показателей энергетической эффективности технологии ОЦР на тепло-технологических объектах.

2. Разработана модель термодинамических процессов в установках ОЦР, система уравнений и краевые условия, учитывающие конфигурацию ОЦР, выбор типа утилизации теплоты, влияние температуры испарения и типа расширителя на эффективность и полноту утилизации. Показано, что модель адекватно отражает результаты экспериментальных исследований.

3. Установлены количественные зависимости влияния термодинамических параметров на эффективность работы системы ОЦР с рабочим телом R142b, заключающиеся в следующем:

- определена зависимость эффективности ОЦР от температуры греющей среды, температуры холодного источника, температуры испарения и температуры конденсации;

- определена оптимальная температура испарения с учетом полноты утилизации и эффективности ОЦР.

4. Разработаны режимы работы и рациональная конструкция установки ОЦР, работающей на рабочем теле R142b, с включением в ее состав ресивера и сепаратора, позволяющие получить дополнительную энергетическую мощность при утилизации на тепло-технологических объектах и увеличить надежность работы установки и запас рабочего тела на период пуска и останова;

5. Разработана методика оценки технико-экономического эффекта от внедрения установок ОЦР различной конфигурации на предприятия цветной металлургии и энергетики. Техничко-экономический анализ показал, что наиболее перспективным способом включения утилизации являются:

- для утилизации теплоты анодных газов на КрАЗе конфигурация с глубокой утилизацией и ОЦР без регенерации, с доходом 4,593 млн. руб./год, экономией топлива 427,1 т.у.т./год и сроком окупаемости 3 года;

- для утилизации теплоты уходящих газов или преобразования теплоты горячей воды на СЦТ-3 конфигурация с глубокой утилизацией и ОЦР без регенерации с доходом 4,593 млн. руб./год, экономией топлива 82,4 т.у.т./год и сроком окупаемости 2 года и преобразование избыточной тепловой энергии сетевой воды с ОЦР без регенерации, с доходом 32,917 млн. руб./год и сроком окупаемости 1 год;

- для утилизации теплоты уходящих газов или преобразования теплоты горячей воды на СЦТ-22 конфигурация с глубокой утилизацией и ОЦР без регенерации с доходом 30,97 млн. руб./год, экономией топлива 334,3 т.у.т./год и сроком окупаемости

2 года и преобразование избыточной тепловой энергии сетевой воды с ОЦР без регенерации, с доходом 400,1 млн. руб./год и сроком окупаемости 1 год;

- для утилизации теплоты уходящих газов от котла БКЗ-420-140-ПТ1 на Красноярской ТЭЦ-2, конфигурация с утилизацией и ОЦР без регенерации с доходом 5,572 млн.руб./год, экономией топлива 2372 т.у.т./год и сроком окупаемости 6 лет

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, из Перечня ВАК:

1. **Карабарин Д.И.,** Михайленко С.А. Анализ методов утилизации тепла анодных газов на алюминиевом производстве. *Промышленная энергетика*. 2017. № 1. 25–29.

2. **Карабарин Д.И.,** Михайленко С.А. Использование низко потенциальных источников энергии на основе органического цикла Ренкина. *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2018. 11(7). 867–876.

3. **Карабарин Д.И.,** Михайленко С.А. Особенности проектирования установок органического цикла Ренкина. *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2019. 12(6). 733–745.

статьи, проиндексированные в международных базах Scopus и Web of Science:

4. **Карабарин Д.И.,** Михайленко С.А. Повышение энергоэффективности производства энергии в районах децентрализованной энергетики. *Известия Томского политехнического университета*. 2017. № 10. 81–86.

5. **Karabarin D.I.,** Mihailenko S.A. Increase of energy efficiency of energy generation due to utilization of waste heat at Krasnoyarsk CHP-2. *Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE)*. 2018. Vol. 450. No. 7: DOI:10.1088/1757-899X/450/7/072014.

6. **Karabarin D.I.,** Mihailenko S.A. Increase of energy efficiency of energy generation due to utilization of waste heat on district heating systems of villages Shapkino and Podtesovo of the North of Krasnoyarsk region. *Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE)*. 2018. Vol. 450. No 7: DOI: 10.1088/1757-899X/450/7/072009.

публикации в трудах научно-технических конференций и опубликованные в других изданиях:

7. **Карабарин Д.И.,** Михайленко С.А. Современные методы повышения коэффициента использования теплофикационного отбора турбин. *«Перспектив свободный – 2015»: Материалы Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых посвященной 70-летию великой победы, «Теплоэнергетика»*: [электронный ресурс]. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 31–34.

8. **Карабарин Д.И.,** Михайленко С.А. Повышение энергоэффективности за счет утилизации низко-потенциального тепла. *«Перспектив свободный – 2016»: Материалы Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых посвященной году образования содружества независимых государств. «Теплоэнергетика и теплотехника»*: [электронный ресурс]. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. 14–18.

9. Скадин А.С., **Карабарин Д.И.** Разработка и внедрение установок, работающих на органическом цикле Ренкина. *«Перспектив свободный – 2016»: «Перспектив свободный*

– 2016»: *Материалы Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых посвященной году образования содружества независимых государств. «Теплоэнергетика и теплотехника»*: [электронный ресурс]. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. 69–72.

10. **Карабарин Д.И.**, Михайленко С.А. Проект автономной котельной в районах децентрализованной энергетики. *Наука и технологии инноваций*: Сб. науч. тр. в 9 ч. Ч. 4. Новосибирск: НГТУ, 2017. 235–237.

11. Скадин А.С., **Карабарин Д.И.** Разработка универсальной программы расчета свойств жидкостей и газов. «Борисовские чтения»: *«Борисовские чтения»: Материалы Всероссийск. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых посвященной столетию профессора Борисова Василия Николаевича. «Энергетика в современном мире»*: [электронный ресурс]. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017.

12. Трохимович., **Карабарин Д.И.** Повышение эффективности получения энергии на Красноярской ТЭЦ-3 путем внедрения сероочистных сооружений. *«Перспектив свободный – 2020»*: *Материалы Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых посвященной году памяти и славы. «Теплоэнергетика»*: [электронный ресурс]. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. 1945–1949.