

На правах рукописи



Беспалов Виктор Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЛУБОКОЙ
УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ
ТЭС НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ**

**05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Беляев Леонид Александрович

Официальные оппоненты: **Тугов Андрей Николаевич,**
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ОАО «Всероссийский дважды ордена трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт», заведующий отделением парогенераторов и топочных устройств.

Жуков Евгений Борисович,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», заведующий кафедрой «Котло- и реакторостроение».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Защита состоится 27 сентября 2017 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в аудитории 217 учебного корпуса № 8 по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте <http://portal.tpu.ru:7777/council/2803/worklist>.

Автореферат разослан: 15 июня 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.269.13
кандидат технических наук, доцент



А.С. Матвеев

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Утилизация тепла уходящих газов является одним из основных направлений повышения эффективности энергетических котлов ТЭС. С началом массового применения природного газа в котельных установках, задача полезного использования тепла дымовых газов приобрела особую важность. Одной из особенностей работы тепловой электростанции на природном газе, или другом углеводородном топливе является повышенное содержание водяных паров в продуктах сгорания. В условиях конкурентного рынка часть станций работает на пониженной мощности, следовательно, объем дымовых газов значительно меньше проектного и меньше скорость их течения в трубе. При низких массовых скоростях дымовых газов в газоходах и дымовой трубе возникает конденсация водяных паров, что приводит к увлажнению стенок, а в зимний период к промерзанию и образованию наледей. Такие явления резко снижают надежность и срок службы газоходов и дымовых труб. Из-за опасности конденсации водяных паров приходится увеличивать температуру уходящих газов, что приводит к росту тепловых потерь котла с уходящими газами.

Глубокая утилизация тепла подразумевает снижение температуры дымовых газов ниже точки росы водяных паров с их последующей конденсацией. При этом утилизируется значительная часть скрытой теплоты конденсации, а конденсат после дополнительной обработки может быть использован для восполнения потерь воды в энергетическом цикле или теплосети. Осушение дымовых газов снижает точку росы водяных паров и предотвращает выпадение влаги в дымовой трубе, что приводит к снижению затрат на ее ремонт и продлению срока службы. Рассматриваемый подход можно применить практически на любом предприятии, где используется сжигание природного газа или другого углеводородного топлива.

Наряду с большим количеством научных публикаций по утилизации тепла дымовых газов и разработанных конденсационных теплоутилизаторов основная масса газовых котельных и энергетических предприятий продолжает терять тепло и редко использует его глубокую утилизацию. Этому есть ряд причин, вызванных отсутствием универсальных методик расчета и проектирования теплоутилизаторов конденсационного типа.

Не разработаны эффективные технологии утилизации тепла дымовых газов с повышенной глубиной (температурой дымовых газов на выходе из конденсатора ниже 20°C).

- Недостаточно проработаны возможности использования другой среды (не воды) в качестве нагреваемого теплоносителя с целью утилизации тепла.
- Недостаточно исследован вопрос выбора оптимальной глубины утилизации (температуры охлаждения дымовых газов в конденсаторе).
- Отсутствуют типовые конструкторские разработки конденсационных поверхностных теплоутилизаторов пластинчатого типа, которые значительно проще и дешевле, чем применяемые теплоутилизаторы с оребренными биметаллическими трубками.

Степень проработанности проблемы. Вопросами утилизации тепла дымовых газов стали интенсивно заниматься в нашей стране и за рубежом после того как котлы на природном газе получили широкое распространение в промышленности. Продукты сгорания природного газа обладают значительным потенциалом для утилизации тепла. Сформировалось несколько научных школ по изучению процесса конденсации водяных паров из смеси с большой долей неконденсирующихся газов. Исследовательские работы велись Киевским НИИСТ под руководством Б.Н. Лобаева и И.З. Аронова. Основное внимание было уделено разработке контактных теплоутилизаторов. В настоящее время в нашей стране и за рубежом наибольшее распространение получила разработка контактных теплоутилизаторов с активной насадкой (КТАН). В Самарском государственном техническом университете в этом направлении ведутся работы под руководством профессора А.А. Кудинова. Известна многолетняя работа ученых Московского энергетического института под руководством профессоров Ю.А. Кузма-Кичты, А.С. Седлова, А.П. Солодова, А.Б. Гаряева. Контактные и поверхностные теплообменные аппараты, применяемые для глубокой утилизации тепла дымовых газов, используют воду для отвода теплоты конденсации водяных паров. На сегодняшний момент проектируемые и эксплуатируемые конденсационные теплоутилизаторы имеют небольшую глубину утилизации: температура дымовых газов снижается в конденсационной зоне не более чем до $30 \div 40^\circ\text{C}$.

Поверхностные пластинчатые конденсационные теплоутилизаторы с подогревом воздуха разрабатываются в Харьковском политехническом институте. Известны работы А.В. Ефимова, Л.В. Гончаренко, предложивших использовать разработанную Московской компанией ООО «ФАСТ ИНЖЕНИРИНГ» оригинальную конструкцию теплообменного аппарата со спиралеобразными гофрированными пластинами для газовых котлов небольшой мощности.

Целью исследования является разработка эффективной технологии утилизации тепла дымовых газов ТЭС на природном газе с использованием воздуха в качестве нагреваемой среды для повышения полноты утилизации.

Задачи исследования.

1. Разработать новую технологию утилизации тепла дымовых газов с использованием воздуха в качестве нагреваемой среды.
2. Разработать алгоритм расчета и оптимизации конструкций установок глубокой утилизации тепла дымовых газов.
3. Разработать методику проектирования установок глубокой утилизации тепла дымовых газов и предложить варианты конструкций установок на широкий диапазон производительности с определением области их применения и оценкой экономической эффективности.

Научная новизна.

1. Предложена и обоснована новая идея, развивающая научную концепцию утилизации тепла дымовых газов ТЭС на природном газе отличающаяся повышенной глубиной утилизации за счет использования воздуха в качестве нагреваемой среды.
2. Создан и апробирован оригинальный алгоритм расчета установки утилизации тепла дымовых газов, отличающийся возможностью определять оптимальную глубину утилизации тепла (конечную температуру охлаждения) дымовых газов для экономических и климатических условий региона и позволяющий рассчитывать основные параметры установок заданной производительности.
3. По новым экспериментальным и расчетным данным получено критериальное уравнение подобия для нахождения коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси к поверхности теплообмена при конденсации водяных паров в пластинчатых теплоутилизаторах.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработанная технология подтверждена патентами на изобретения (№ 2436011, № 2606296) и позволяет повысить коэффициент использования топлива котлов на природном газе на 15÷17%. Для ТЭС возможно полное замещение собственных нужд по теплу даже при утилизации тепла четверти расхода дымовых газов. Максимальная эффективность достигается при утилизации всего объема дымовых газов, например, на газовых котельных или ТЭЦ промышленных предприятий, где есть возможность осуществить воздушное отопление производственных цехов.
2. Программный продукт, реализующий алгоритм оптимизации и расчета установки, предназначен для проектирования промышленных установок глубокой утилизации тепла дымовых газов и может использоваться научными, проектными и промышленными организациями (свидетельство о гос. рег. программ для ЭВМ №2016610134).
3. Доказана экономическая целесообразность применения конденсационных теплоутилизаторов не только в регионах Сибири, но и в Центральном регионе России.
4. Полученное критериальное уравнение подобия применимо для нахождения коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси к поверхности теплообмена при конденсации водяных паров в пластинчатых теплоутилизаторах.
5. Результаты исследования и предложенная методика использованы при проектировании промышленной установки для Томской ТЭЦ-3. Проект одобрен экспертами ПАО «Интер РАО». Реализация проекта намечена на 2018 год. Спроектированы типовые установки для газовых котлов большой и малой энергетики.

Методология и методы исследования

Основу теоретических исследований составляют классический метод теплового баланса системы и ее элементов, методы расчета тепло- и массообмена. Оптимизационные расчеты основаны на методе технико-экономических расчетов в энергетике. Базой экспериментальных исследований являлась лабораторная установка кафедры АТЭС ТПУ и экспериментальная установка, смонтированная на Томской ТЭЦ-3.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Технология утилизации тепла дымовых газов ТЭС на природном газе с использованием воздуха в качестве нагреваемой среды.
2. Алгоритм оптимизации и расчета установок глубокой утилизации тепла дымовых газов.
3. Новые экспериментальные данные, подтверждающие адекватность алгоритма расчета. Критериальное уравнение подобия, позволяющее вычислять коэффициент теплоотдачи от парогазовой смеси к вертикальной поверхности теплообмена при конденсации водяных паров в пластинчатых теплообменных аппаратах.
4. Методика проектирования установок глубокой утилизации тепла дымовых газов с подогревом воздуха и использованием поверхностных пластинчатых теплообменных модулей.

Степень достоверности и апробация результатов. Разработка технологии утилизации тепла дымовых газов проводилась с применением алгоритма расчета, включающего основные уравнения теплового баланса и теплопередачи каждого элемента схемы. Выходные параметры установки рассчитываются итерационными методами с заданной погрешностью, не превышающей 1%. Расчетные коэффициенты теплопередачи проверены на лабораторной и экспериментальной установках. Отклонения не превышают 10%. Результаты экспериментов подтвердили эффективность разработанной технологии и адекватность алгоритма расчета.

Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на международном семинаре «Устойчивое развитие и ресурсоэффективность», Австрия, г. Вена, 27–31 октября 2013 г.; III Международном форуме «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск, 28 сентября – 2 октября 2015 г.; VI Всероссийской научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 13–15 октября 2015 г.; Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика – 2016» с элементами школы молодых ученых, г. Ялта, 19–25 сентября 2016 г.

Проект промышленной установки для Томской ТЭЦ-3 получил высокую оценку на конкурсах международных выставок: золотые медали Международной выставки-конгресса «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции (Hi-Tech'2012)» (Санкт-Петербург, 13–15

марта 2012 г.), Межрегиональной специализированной выставки «Энергосбережение. Энергетика. Электротехника – 2012» (Томск, 14–16 ноября 2012 г.), Международного форума и выставки «Высокие технологии XXI века» (Москва, 25–26 апреля 2013 года); серебряная медаль Международной промышленной выставки-форума «Развитие инфраструктуры Сибири - IDES / СИБПОЛИТЕХ» (Новосибирск, 16–19 октября 2012 г.).

Личный вклад автора состоит в проведении патентных исследований и совершенствовании технологии утилизации тепла дымовых газов, выборе методов и алгоритмов расчета установки, выводе целевой функции для оптимизации глубины утилизации тепла и получении расчетных данных об эффективности применения теплоутилизаторов, проведении экспериментальных исследований на лабораторной и экспериментальной установках, обработке полученных результатов эксперимента, разработке методики проектирования конденсационных поверхностных пластинчатых теплоутилизаторов и проектировании ряда конструкций различной производительности.

Публикации. Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в 13 печатных работах, из которых 3 статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК, 2 патента на изобретение, 1 свидетельство о регистрации программ для ЭВМ и 4 публикации в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science. Статья «Исследование и оптимизация глубины утилизации тепла дымовых газов в поверхностных теплообменниках» принята к публикации в журнале «Теплоэнергетика», № 9 за 2017 г. Полный список публикаций приведен в конце автореферата.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа включает: введение, шесть глав, основные результаты и выводы, список литературы, содержащий 104 наименования, приложения. Объем диссертации составляет 119 страниц машинописного текста, 34 рисунка, 20 таблиц и 7 страниц приложений.

Основное содержание работы

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертационного исследования, постановку цели и задач по ее реализации. Определены научная новизна, теоретическая и практическая значи-

мость работы, положения, выносимые на защиту, а также степень достоверности, апробация результатов и личный вклад автора.

Первая глава описывает степень проработанности проблемы глубокой утилизации тепла дымовых газов в публикациях различных авторов. Определен энергетический ресурс утилизации – максимальное количество теплоты, которое можно извлечь из продуктов сгорания природного газа при их охлаждении и конденсации содержащегося в них водяного пара. Проанализированы применяемые технологии и установки, как контактного, так и поверхностного типа. Для сравнения эффективности установок в диссертации введены два коэффициента. Коэффициент глубины осушения дымовых газов K_o , равный отношению расхода конденсата к его максимально извлекаемому значению. При $K_o = 1$ происходит максимально возможная теоретически конденсация водяного пара, а при $K_o = 0$ конденсации нет. Здесь определяющим фактором является конечная температура дымовых газов, равная температуре точки росы остаточных водяных паров. Она определяет конечное влагосодержание, итоговый расход конденсата и мощность конденсатора. В теоретически предельном случае, когда дымовые газы охлаждаются до 0°C , остаточное их влагосодержание составляет 3,7 грамма на килограмм сухих газов ($г/кг.с.г$). Коэффициент глубины утилизации тепла K_z , определяемый как отношение действительной мощности теплоутилизатора к теоретической (максимально возможной). Этот коэффициент является более показательным для сравнения теплоутилизаторов, так как учитывает тепловую мощность, получаемую от охлаждения перегретых дымовых газов, а также потери тепла с конденсатом и остаточными водяными парами.

Обобщение публикуемых данных о применяемых теплоутилизаторах показывает, что охлаждение дымовых газов обычно происходит до температуры $35\div 45^\circ\text{C}$. Коэффициент глубины осушения составляет не более 0,7. Коэффициент глубины утилизации так же не высок. Это обусловлено использованием воды в качестве нагреваемой среды. Большая глубина утилизации достигается только в случае использования другой среды нагрева, которая может иметь отрицательные рабочие температуры, например холодный воздух. Проведено обоснование целесообразности применения воздуха в качестве нагреваемой среды при глубокой утилизации тепла дымовых газов. В зимнее время на большинстве территории России

устанавливается отрицательная температура. Для регионов Сибири среднемесячная температура воздуха зимой опускается ниже минус 15°C. Воздухом дымовые газы охлаждаются значительно сильнее, поэтому представляется возможным достижение высокого коэффициента глубины осушения, приближающегося к 1.

Вторая глава содержит описание разработанной новой технологии глубокой утилизации тепла дымовых газов (Рисунок 1). Исходные дымовые газы охлаждаются в газо-газовом поверхностном пластинчатом рекуперативном теплообменнике ТО, нагревая осушенные дымовые газы для предотвращения возможной конденсации водяных паров в газоходах и дымовой трубе. В газо-воздушном поверхностном пластинчатом теплоутилизаторе ТУ происходит дальнейшее охлаждение дымовых газов и конденсация водяных паров с нагревом воздуха. Воздух подается в теплоутилизатор блоком вентиляторов В. Дополнительный дымосос Д компенсирует аэродинамическое сопротивление газового тракта теплообменников. Перед дымососом Д по газоходу рециркуляции подводится небольшое количество (5÷10%) подогретых осушенных дымовых газов для исключения конденсации остаточной влаги на лопастях дымососа. Конденсат после дополнительной обработки используется для восполнения потерь в теплосети или паротурбинном цикле.

К преимуществам использования воздуха в качестве нагреваемой среды относится то, что его конечная температура 30°C достаточна для воздушного отопления производственных помещений. Создаваемое избыточное давление исключает присосы холодного воздуха в помещения. К недостаткам предлагаемого подхода следует отнести тот факт, что такое большое количество нагретого воздуха не всегда возможно полезно использовать. Например, в отдельных модульных газовых котельных, где нет большого объема помещений. В этом случае целесообразно использовать для утилизации только часть дымовых газов, рассчитанную на повышенный нагрев только дутьевого воздуха. Однако даже для такого случая можно повысить эффективность газовой котельной на 2÷3%.

Максимальная эффективность использования воздуха достигается для газовых котельных или ТЭЦ, размещенных на территории промышленных предприятий, где есть возможность осуществить воздушное отопление производственных цехов.

ного аэродинамического сопротивления теплообменников и газоходов. Как показал анализ дополнительных затрат энергии на экспериментальной установке, в энергетическом эквиваленте они составляют не более 3÷5% от сберегаемого тепла и не более 10÷12% в экономическом эквиваленте. Отсюда пропорциональная зависимость эксплуатационных энергетических затрат от тепловой производительности установки $C_o = E_y \cdot C_{co}$, где C_{co} коэффициент эксплуатационных затрат.

Капитальные затраты в общем случае можно представить как функцию величины поверхности теплообмена F (m^2) и удельных затрат на ее создание C_f (руб./ m^2): $K = F \cdot C_f$.

Снижение издержек источника за счет глубокой утилизации тепла дымовых газов при неизменной величине отпуска тепла потребителям приведет к соответствующему снижению годового расхода топлива ΔB и затрат на него E_y :

$E_y = \Delta B \cdot C_g = \frac{\Delta Q_y \cdot C_g}{\eta_k^n \cdot Q_n^p}$, где ΔQ_y – годовое количество тепла, полученное от теплоутилизатора (МДж); η_k^n – КПД котла нетто; Q_n^p – объемная теплота сгорания топлива (МДж/ m^3); C_g – цена газообразного топлива (руб./ m^3). После подстановок исходная формула принимает вид

$$EE_y = \frac{\Delta Q_y \cdot C_g}{\eta_k^n \cdot Q_n^p} \cdot (1 - C_{co}) - E_{nc} \cdot F \cdot C_f.$$

Мощность теплоутилизатора может быть выражена как функция от конечной температуры дымовых газов:

$$Q_k(t_0) = G_s \cdot c_{p.s} \cdot (t_1 - t_0) + G_w \cdot h_1'' - G_s \cdot d_0 \cdot h_0'' \cdot 10^{-3}.$$

Здесь G_s и G_w – массовые расходы сухих дымовых газов и водяных паров ($кг/с$); α – коэффициент избытка воздуха; d_1 , d_0 – начальное и конечное влагосодержание дымовых газов ($г/кг.c.c.г$); t_1 , t_0 – начальная и конечная температура дымовых газов; $c_{p.s}$ – теплоемкость сухих дымовых газов; h_1'' и h_0'' – энтальпии насыщенных водяных паров при температурах t_1 и t_0 . Требуемая (расчетная) поверхность теплообмена определяется по уравнению теплопередачи

$$F(t_0) = \frac{Q_k(t_0) \cdot 10^3}{k_t \cdot \Delta \bar{t}_c}, \text{ где } \Delta \bar{t}_c - \text{среднелогарифмический температурный напор; } k_t - \text{общий коэффициент теплопередачи (Вт} \cdot \text{м}^2/\text{К}).$$

После соответствующих подстановок была получена целевая функция $EE_y(t_0)$. Полученная целевая функция ожидаемой прибыли энергопредприятия от конечной температуры дымовых газов на выходе из конденсатора имеет максимум и зависит от большого числа факторов: средней температуры и длительности отопительного периода, стоимости природного газа, общего коэффициента теплопередачи, удельной стоимости площади теплообмена коэффициента эксплуатационных затрат.

Исследование влияния отдельных факторов на точку максимума целевой функции выявило ее смещение от 8 до 20°C в широких пределах изменения каждого из факторов ($30 \leq k_t \leq 70$; $2000 \leq C_f \leq 6000$; $0,05 \leq C_{co} \leq 0,3$; $0,05 \leq C_{co} \leq 0,3$; $2,5 \leq C_g \leq 6$). Исследовано взаимное влияние климатических и экономических факторов для различных регионов. На рисунке 2 показаны графики целевой функции для рассмотренного диапазона регионов России.

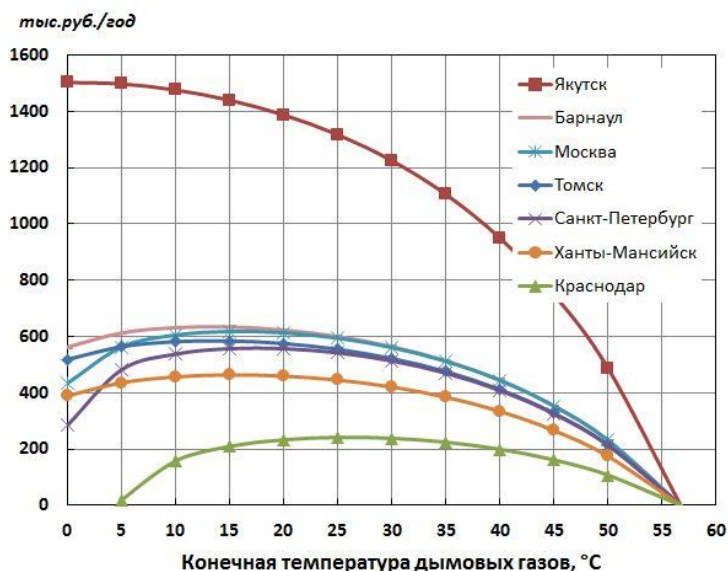


Рисунок 2. Зависимость графика целевой функции от региона России при взаимном влиянии климатических и экономических факторов.

Максимальный эффект даст работа утилизационных установок в наиболее холодных и удаленных районах, где сравнительно высокая цена на газ. В таких регионах установка глубокой утилизации

тепла будет работать практически весь долгий отопительный период на максимальную мощность. Наименее выгодна эксплуатация установок в теплых регионах юга России. Высокая цена топлива не компенсирует снижение затрат при коротком отопительном периоде с высокой средней температурой воздуха. Результаты оптимизационных расчетов для некоторых городов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты оптимизационных расчетов для некоторых городов.

Город	Отопительный период		Цена на газ	Оптимальная температура	Срок окупаемости
	Средняя температура	Длительность			
	$t_v, ^\circ\text{C}$	$\tau_{om}, \text{час}$			
Якутск	-20,6	10394	4	2	0,9
Барнаул	-7,7	5304	4,04	14	1,6
Москва	-3,1	4943	4,37	15	1,7
Вятка	-5,4	5544	3,821	15	1,7
Томск	-8,5	5352	3,75	13	1,7
Ульяновск	-5,4	5088	4	15	1,75
Санкт-Петербург	-1,8	4796	4,215	17	1,7
Уренгой	-13,1	6864	2,395	13	1,9
Ханты-Мансийск	-8,8	6000	2,819	15	2
Краснодар	2	2682	4,46	25	2,8

Ожидаемая приведенная годовая прибыль энергопредприятия от внедрения теплоутилизационной установки в Западной Сибири и в Центральных районах России будет близка по величине, несмотря на различные климатические условия. Полученные данные доказывают перспективность Центрального и Северо-западного регионов для проектирования и применения установок глубокой утилизации тепла.

Пологий характер целевой функции в области ее максимума расширяет диапазон температур при проектировании теплоутилизаторов.

Далее рассматривается оптимизация площади теплообмена рекуперативного теплообменника. Технологически он предназначен для предварительного охлаждения исходных дымовых газов и подогрева осушенных, которые выходят из конденсационной зоны теплоутилизатора с температурой насыщения остаточных водяных паров. Для подачи осушенных дымовых газов в дымовую трубу их

необходимо нагреть на величину, которую определяют потери тепла в газоходах и самой трубе. То есть создать температурный запас для предотвращения возможной конденсации водяных паров. Это расчетная величина, зависящая от состояния газоходов и трубы на конкретном энергопредприятии. При минимизации температурного запаса необходимо, чтобы температура дымовых газов на выходе из дымовой трубы не опускалась ниже точки росы остаточных водяных паров. Температура нагрева определяет площадь теплообмена рекуперативного теплообменника, его мощность и соответственно, по тепловому балансу, температуру охлаждения исходных дымовых газов. Как показали расчеты, в большинстве случаев на рекуперацию требуется 10÷13% тепловой мощности теплоутилизационной установки. При этом температура охлажденных дымовых газов не достигает точки росы из-за высокой начальной температуры дымовых газов (130÷170°C и выше). Это приводит к образованию в теплоутилизаторе сухой зоны ОХ (Рисунок 1) и существенному уменьшению конденсационной К.

Коэффициент теплопередачи в сухой зоне в несколько раз ниже, чем в конденсационной. Это существенно снижает эффективность использования поверхности теплообмена. Дальнейшее совершенствование технологии глубокой утилизации тепла предполагает установку дополнительного элемента для доохлаждения дымовых газов. Если охладить дымовые газы до температуры, близкой к точке росы, то на всей поверхности теплоутилизатора будет происходить конденсация. Рассмотрены варианты конструкций дополнительного теплообменника для доохлаждения дымовых газов. Наиболее эффективен контактный газо-водяной теплообменник – водоподогреватель ВП (Рисунок 1). На входе в водоподогреватель дымовые газы имеют достаточно высокую температуру 130÷90°C, что позволяет нагревать воду до 50÷65°C с частичным ее испарением. На выходе из водоподогревателя дымовые газы имеют температуру точки росы содержащихся в них водяных паров, что повышает эффективность использования поверхности теплообмена в конденсаторе, исключает образование сухих зон конденсатора и повышает коэффициент теплопередачи. В качестве нагреваемой воды целесообразно использовать полученный в теплоутилизаторе конденсат. Для снижения аэродинамического сопротивления по дымовым газам конструкция водоподогревателя может быть без насадки с раз-

брызгиванием конденсата в свободном объеме. В случае высоких скоростей дымовых газов предполагается комплектовать водоподогреватель насадкой в виде пластинчатых ячеек для стекания конденсата с целью предотвращения уноса капель в теплоутилизатор.

Четвертая глава содержит описание алгоритма расчета установки. Алгоритм предусматривает предварительное задание геометрии теплообменных аппаратов. Теплообменник ТО и теплоутилизатор составляются из пластинчатых теплообменных модулей – пакетов. Для пакета задаются: длина, ширина, толщина листа, коэффициент теплопроводности, число листов и зазор между ними. Для каждого теплообменника задается число пакетов и число ходов теплоносителя. Геометрия пакетов теплообменника ТО и теплоутилизатора может различаться, однако для установок большой мощности (более 1 МВт) целесообразно применять унифицированные пакеты.

Исходными данными для алгоритма расчета являются температура холодного воздуха $t_{хв}$ и массовый расход дымовых газов с температурой t_g , состоящий из сухих дымовых газов G_s и водяных паров G_w . Так же считаем известной температуру дымовых газов на выходе из охладителя ОХ $t_{1с}$, равную температуре насыщения водяных паров при исходной влажности. Остальные параметры вычисляются методами последовательных приближений по уравнениям теплового баланса и теплопередачи каждого элемента.

При моделировании процесса теплообмена основную сложность, влияющую на точность полученного результата, представляет расчет коэффициентов теплопередачи:

$$k_t = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}}$$
, где α_1 – коэффициент теплоотдачи от горячей среды (дымовых газов) к поверхности теплообмена, δ_{cm} – толщина стенки, λ_{cm} – коэффициент теплопроводности стенки, α_2 – коэффициент теплоотдачи от поверхности теплообмена к нагреваемой среде. Для теплообменников, в которых обе газообразные среды не претерпевают фазового перехода (нет конденсации водяных паров), коэффициенты теплоотдачи рассчитываются обычным методом и зависят в основном от скоростей газов. Это справедливо для расчета коэффициента теплопередачи рекуперативного теплообменника ТО и части охлаждения ОХ теплоутилизатора. При расчете коэффициента теплопередачи конденсационной части К тепло-

утилизатора таким же образом рассчитывается коэффициент теплоотдачи от стенки к воздушному потоку. Для определения коэффициента теплоотдачи от влажных дымовых газов к стенке поверхности теплообмена α_1 при конденсации находящихся в них водяных паров на сегодняшний день не разработана универсальная методика расчета. Все известные методы основываются на обработке результатов экспериментальных данных и предлагают зависимости в довольно узких пределах изменения физических параметров сред. Применимость того или иного метода расчета для функционально схожих теплоутилизаторов требует анализа и обоснования. Разработанный алгоритм расчета установки позволяет выбирать разные методики.

При известном термическом сопротивлении поверхности теплообмена и коэффициенте теплоотдачи от стенки к воздушному потоку α_2 , можно оценить влияние α_1 на общий коэффициент теплопередачи k_t . В рассматриваемом теплоутилизаторе α_2 не превышает $80 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Вследствие конденсации паров теплоотдача со стороны влажных дымовых газов гораздо выше, если обеспечивается турбулентный режим. При больших значениях α_1 (более $200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) коэффициент теплопередачи в большей мере зависит от теплоотдачи со стороны воздуха α_2 и составляет $50 \div 70 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Разработанный алгоритм расчета установки реализован в виде программного продукта (приложения), который позволяет подобрать оптимальные геометрические параметры установок различной производительности и провести проверочные расчеты их работы.

Пятая глава содержит результаты экспериментальных исследований. Для проверки адекватности алгоритма расчета установки проведено экспериментальное подтверждение правильности вычисления коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси к вертикальной поверхности теплообмена при конденсации на ней водяных паров. В качестве парогазовой смеси использован нагнетаемый вентилятором поток воздуха, увлажненный водяным паром, поступающим в камеру смешения из электрического парогенератора. Влагосодержание полученной смеси рассчитывалось исходя из влагосодержания исходного воздуха и количества испаренной воды в парогенераторе. Паровоздушная смесь подавалась в вертикальный теплообменник, содержащий газовый канал прямоугольного сече-

ния 10×2 см, окруженный охлаждающим водяным каналом. Применение воды в качестве нагреваемой среды обусловлено тем, что коэффициент теплоотдачи от стенки к воде значительно выше, чем от паровоздушной смеси к стенке, что дает возможность определить последний с большей точностью. Прежде всего были проведены опыты без добавления пара к потоку воздуха. Определенный коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке хорошо согласовался с расчетами по известным критериальным уравнениям. Далее исследовалось влияние скорости потока на значение коэффициента теплоотдачи. Скорость потока менялась от 1.8 до 3.7 м/с. Выявлено, что коэффициент теплоотдачи существенно зависит не столько от расхода смеси, сколько от ее начальной влажности. Процесс конденсации водяных паров увеличивает коэффициент теплоотдачи от смеси к поверхности теплообмена в $1,5 \div 10$ раз. Проведенные эксперименты позволили получить значения коэффициента теплоотдачи с погрешностью 20÷40% (Рисунок 3).

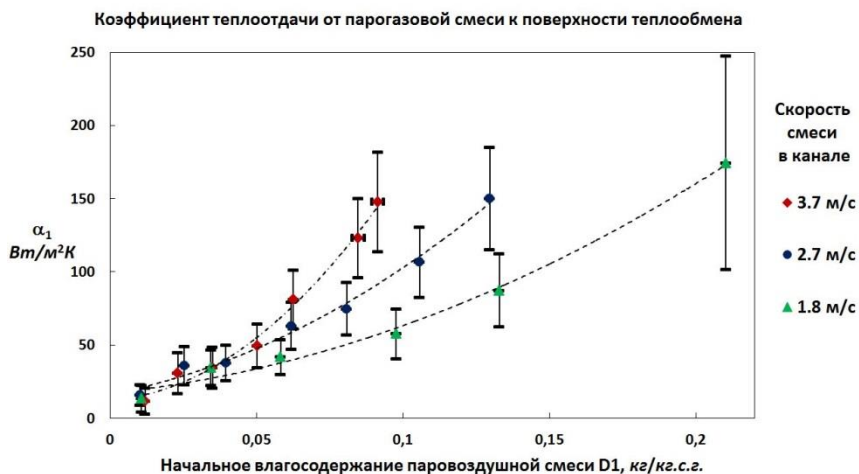


Рисунок 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от начальной влажности смеси при разных скоростях потока.

На основе экспериментальных исследований и физических представлений известно, что коэффициент теплоотдачи от паровоздушной смеси к поверхности теплообмена при конденсации водяных паров является функцией следующих физических величин

$$\alpha = f(D, w, \rho, \mu, \lambda, c, W),$$

где D – геометрический параметр, эквивалентный диаметр канала (m); w – скорость потока смеси (m/c); ρ , μ , λ , c – соответственно плотность ($кг/м^3$), кинематическая вязкость ($м^2/с$), теплопроводность ($Вт/(м \cdot K)$) и теплоемкость паровоздушной смеси ($Дж/(кг \cdot K)$); W – плотность орошения поверхности теплообмена конденсирующимися водяными парами ($кг/(м^2 \cdot c)$).

При использовании метода анализа размерностей критериальное уравнение подобия имеет вид $Nu = B \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot K^R$.

Здесь $Nu = \alpha \cdot D / \lambda$ – критерий Нуссельта; $Re = w \cdot D / \nu$ – критерий Рейнольдса; $Pr = \nu / a$ – критерий Прандтля, a – температуропроводность, ν – динамическая вязкость паровоздушной смеси; $K = W \cdot D / \mu$ – критерий орошения, $W = G_k / F$, G_k – расход конденсата, F – площадь теплообмена.

Определение показателей степени m , n , R и коэффициента B проводилось, опираясь на приведенные выше результаты экспериментов. Критериальное уравнение

$$Nu = 5,4 \cdot Re^{0,34} \cdot Pr^{2/3} \cdot K^{1,14}$$

получено при $3400 \leq Re \leq 7350$; $0,8 \leq K \leq 2,7$; $0,6 \leq Pr \leq 0,7$.

Сравнение значений коэффициента теплоотдачи α_1 вычисленных по критериальному уравнению и полученных экспериментально показано в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение расчетных значений коэффициента теплоотдачи α_1 ($Вт/(м^2 K)$) с экспериментальными данными.

№	w , $м/с$	W , $кг/(м^2 \cdot c)$	Re	K	α_1 расчет	$\alpha_{1э}$ эксперимент	погрешность δ , %
1	3,7	0,430	7453	0,802	51	49±15	3,0
2	3,7	0,979	7453	1,793	132	123±27	6,6
3	3,7	1,096	7453	2,007	150	148±34	1,4
4	2,7	0,683	5498	1,251	79	75±18	5,0
5	2,7	0,956	5498	1,733	116	107±24	8,5
6	2,7	1,244	5498	2,245	158	150±35	5,2
7	1,8	0,611	3471	1,109	60	58±17	3,6
8	1,8	0,909	3471	1,634	95	87±25	7,8
9	1,8	1,534	3471	2,728	173	174±70	0,6

Полученное критериальное уравнение позволяет вычислять коэффициент теплоотдачи с относительной погрешностью менее 10% при указанных выше условиях.

На базе Томской ТЭЦ-3 была создана экспериментальная установка по глубокой утилизации тепла дымовых газов. Проведена серия из пяти экспериментов с целью опытного определения коэффициента теплопередачи и коэффициентов теплоотдачи. Погрешность определения коэффициента теплопередачи составила 15%. По результатам экспериментов общий коэффициент теплопередачи был равен $62 \pm 9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. При этом определенный коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху $82 \pm 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и известное термическое сопротивление стенки позволили определить коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке. Последний с учетом погрешности оказался равным $251 \pm 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Экспериментальные исследования позволили проверить эффективность разработанной технологии, показали возможные пути ее совершенствования и подтвердили адекватность алгоритма расчета установки.

Шестая глава содержит описание общей методики и результатов проектирования установок. Разработанная методика проектирования конденсационных поверхностных пластинчатых установок глубокой утилизации тепла дымовых газов с подогревом воздуха состоит из следующих этапов.

1. Определение исходных параметров дымовых газов.
2. Предварительный расчет конденсационной площади теплообмена с оптимизацией ожидаемой приведенной годовой прибыли от глубины утилизации.
3. Определение необходимого нагрева дымовых газов в рекуперативном теплообменнике и его площади теплообмена.
4. Проектирование конструкции унифицированного пакета теплообмена.
5. Компоновка рекуперативного теплообменника и теплоутилизатора.
6. Проектирование конструкции контактного водоподогревателя.
7. Расчет установки, анализ результатов и коррекция конструкции.

По предложенной методике были разработаны оригинальные конструкции установок на различный расход дымовых газов. Сравнительные характеристики установок приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты проектирования установок

Параметры установки	Варианты проектирования						
Расход дымовых газов, $\text{м}^3/\text{с}$	20	10	7	4	1	0,5	0,07
Температура дымовых газов t_g , $^{\circ}\text{C}$	130	150	150	170	170	170	100
Температура точки росы t_{1s} , $^{\circ}\text{C}$	56	56	56	56	56	56	56
Площадь теплообмена ТО, F_p , м^2	1653	802	401	200	62	23	4
Мощность ТО, Q_p , кВт	1133	586	390	241	66	28	2,5
Мощность ВП, Q_v , кВт	144	78	52	29	7	4	0,5
Площадь теплообмена ТУ F_t , м^2	4960	2480	1653	1033	236	110	18
Расход конденсата G_k , $\text{кг}/\text{с}$	2,5	1,3	0,9	0,5	1,12	0,06	0,01
Расход воздуха V_v , $\text{м}^3/\text{с}$	178	101	70	35	8	5	0,6
Нагрев воздуха от $-8,5$ до t_{qv} , $^{\circ}\text{C}$	+26	+24	+24	+30	34	+26	+24
Мощность ТУ, кВт	7746	4174	2920	1732	425	222	26
Температура охлаждения д.г. t_0 , $^{\circ}\text{C}$	17	14	16	18	19	16	14
Температура уходящих д.г. t_4 , $^{\circ}\text{C}$	72	72	70	76	84	70	50
Капитальные вложения, <i>тыс.руб.</i>	21820	10830	6780	4071	984	438	73
Срок окупаемости, <i>год</i>	1,36	1,3	1,12	1,14	1,12	1	1,3
Повышение КПД* котла, %	15	16	16	17	17	17	15

* КПД котла при утилизации тепла всего объема дымовых газов, определенный по высшей теплотворной способности топлива.

Основные результаты и выводы

1. Разработана новая технология утилизации тепла дымовых газов ТЭС на природном газе с использованием воздуха в качестве нагреваемой среды, способная повысить коэффициент использования топлива на $15 \div 17\%$. Максимальная эффективность достигается для газовых котельных или ТЭЦ, размещенных на территории промышленных предприятий, где есть возможность осуществить воздушное отопление производственных цехов, при этом утилизируется весь объем дымовых газов.
2. Разработан алгоритм и программный продукт оптимизации и расчета установок, позволяющие определить конечную температуру охлаждения дымовых газов, на которую следует проектировать теплоутилизационную установку для получения максимальной ожидаемой приведенной годовой прибыли предприятия от ее внедрения, проектировать установки на различную производительность, проводить поверочные расчеты и подбирать оптимальную конструкцию. Полученные данные доказывают перспективность Центрального и Северо-западного регионов

для проектирования и применения установок глубокой утилизации тепла. Значения оптимальной конечной температуры охлаждения дымовых газов составляют от 14 до 16°C, срок окупаемости $1,7 \div 1,75$ года.

3. Получены новые экспериментальные и расчетные данные, подтверждающие адекватность алгоритма расчета установок. Получено критериальное уравнение подобия для нахождения коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси к поверхности теплообмена при конденсации водяных паров в пластинчатых теплоутилизаторах с относительной погрешностью менее 10% в диапазонах $3400 \leq Re \leq 7350$; $0,8 \leq K \leq 2,7$; $0,6 \leq Pr \leq 0,7$.
4. По предложенной методике разработаны оригинальные конструкции установок для большой и малой энергетики. В климатических и экономических условиях г. Томска они повышают эффективность использования топлива газовых котлов на 15% при утилизации тепла всего объема дымовых газов и имеют срок окупаемости не более 1,5 лет.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. **Беспалов, В.В.** Технология осушения дымовых газов ТЭС с использованием теплоты конденсации водяных паров / В.В. Беспалов, В. И. Беспалов // Известия ТПУ. – 2010. – Т. 316, № 4: Энергетика. – С.56–59.
2. **Беспалов, В.В.** Технологии глубокой утилизации тепла дымовых газов / В.В. Беспалов // Энергетика Татарстана. – 2015. – №2(38). – С.32–36.
3. **Беспалов, В.В.** Моделирование поверхностных конденсационных теплоутилизаторов дымовых газов для подогрева воздуха / В.В. Беспалов // Энергетика Татарстана. – 2016. – №2(42). – С.39–44.
4. **Пат. 2436011 Российская Федерация, МПК F22B 1/18.** Устройство утилизации тепла дымовых газов и способ его работы / В.И. Беспалов, В.В. Беспалов. – № 2010127110/06 ; заявл. 01.07.2010 ; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34. – 10с. : ил.
5. **Пат. 2606296 Российская Федерация, МПК F22B 1/18.** Способ глубокой утилизации тепла дымовых газов / В.И. Беспалов, В.В. Беспалов. – №2015109444/06 ; заявл. 17.03.2015 ; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. – 10с. : ил.

6. **Свидетельство о гос. рег. программ для ЭВМ 2016610134 Российская Федерация.** Расчет установки по глубокой утилизации тепла дымовых газов / В.В. Беспалов, В.И. Беспалов. – №2015661012; заявл. 16.11.2015; опубл. 20.02.2016, Бюл. № 2.
7. **Bespalov, V.V.** Using Air for Increasing the Depth of the Flue Gas Heat Recovery / V.V. Bespalov, L.A. Belyaev, D.V. Melnikov // MATEC Web of Conferences. – 2015. – № 37. – 01009.
8. **Bespalov, V.V.** Evaluation of Heat Transfer Coefficients During the Water Vapor Condensation Contained in the Flue Gas / V.V. Bespalov, V.I. Bespalov, D.V. Melnikov // EPJ Web of Conferences. – 2016. – № 110. – 01007.
9. **Bespalov, V.V.** Simulation of surface-type condensing units for heat recovery from the flue gas with air heating / V.V. Bespalov, L.A. Belyaev, L.S. Kuchman // MATEC Web of Conferences. – 2017. – № 91. – 01003.
10. **Bespalov, V.V.** Experimental study of heat transfer from the gas-vapor mixture to the surface in rectangular channel with the water vapor condensation / V.V. Bespalov, V.I. Bespalov, D.V. Melnikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – №754. – 042002.
11. **Беспалов, В.В.** Экспериментальное исследование теплоотдачи от парогазовой смеси к пластине при конденсации водяных паров / В.В. Беспалов, В.И. Беспалов, Д.В. Мельников // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых (19 – 25 сентября 2016 г.), Республика Крым, г. Ялта. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН. – 2016. – С.14.
12. **Беспалов, В.И.** Повышение эффективности работы ТЭС на углеводородном топливе / В.И. Беспалов, В.В. Беспалов, О.В. Ковалев, Е.А. Ревин, Р.Е. Боберь, А.Н. Ципкин // Теплофизические основы энергетических технологий: материалы региональной научно-практ. конф. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2009. – С.154–159.
13. **Беспалов, В.В.** Технология и проект установки по осушению дымовых газов ТЭС с использованием теплоты конденсации водяных паров / В.В. Беспалов, В.И. Беспалов // Повышение эффективности энергетического оборудования: материалы VIII Международной научно-практической конференции. – М.: Изд-во МЭИ, 2013. – С.489–502.