

АННОТАЦИЯ

диссертации, представленной на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности «6D071700 – Теплоэнергетика»

СЕЙДАЛИЕВОЙ АЙГАНЫМ БУЛАТҚЫЗЫ

на тему **«Разработка и исследование высокоэффективных
водогрейных котлов малой мощности»**

В Казахстане, наряду с развитием крупных ТЭЦ, наблюдается устойчивая тенденция роста числа малых и средних котельных установок. На сегодняшний день, децентрализованных системах теплоснабжения функционирует более 5000 малых водогрейных котлов, работающих на жидком и газообразном топливе. Одной из ключевых задач государственной политики в области инфраструктурного развития является расширение газораспределительной сети, с целью обеспечения газоснабжением к 2030 году таких регионов, как город Астана, Акмолинская и Карагандинская области.

В настоящее время ТОО «АТКЭ» управляет 85 районными котельными, работающими на газовом и жидком топливе. Однако при подключении старых районов или новых территорий к городским тепловым сетям, как наблюдается, например, в городе Алматы выявляется наличие морально и технически устаревших маломощных котельных агрегатов, использующих твердое (уголь) и жидкое (дизельное) топливо. Эти установки характеризуются низкой эффективностью, повышенным уровнем выбросов и значительными эксплуатационными затратами. На фоне данных вызовов современный рынок энергетического машиностроения стремительно развивается, предлагая широкий спектр оборудования, ориентированного на повышение энергоэффективности и снижение воздействия на окружающую среду. Учитывая резко континентальный климат Казахстана, надежное и экономически обоснованное обеспечение тепловой нагрузки систем отопления и горячего водоснабжения, составляющей до 40% от общего расхода первичных энергоресурсов, является критически задачей для устойчивого развития теплоэнергетического комплекса страны.

На рынке Казахстана котлы малой производительности представлены основными типами котлов: водотрубными и жаротрубными.

Определенное время в странах постсоветского пространства производились в основном водотрубные котельные агрегаты. Водотрубные котлы применялись как на крупных энергетических объектах, так и для нужд малой энергетики. Главное преимущество таких котлов - организация движения теплоносителя в водяных контурах, который обеспечивает необходимый температурный режим воды и уменьшает загрязнения теплообменных поверхностей. Однако для надежной работы всей трубной системы водотрубных котлов необходимо строго соблюдать режим гидродинамики во всех режимах работы с частичной или даже минимальной

мощностью, что обуславливает достаточно высокое гидравлическое сопротивление водотрубных котлов.

Уже более десяти лет в странах СНГ широко используются котлы жаротрубной конструкции.

Большинство европейских (ICI Caldaie, Buderus, Viessmann, Bosch, Siemens, и др.) и российских (ООО «Компания РЭМЭКС-Энерго», ОАО «Дорогобужкотломаш», ЗАО ПО «Бийскэнергомаш», ЗАО «Уралкотломаш», ОАО «Белгородский завод энергетического машиностроения», ЗАО СП «ЗИОСАБ») производителей котельной техники ориентированы на выпуск именно жаротрубных котлов.

Длительный опыт эксплуатации жаротрубных котлов показал наличие уже достигнутых предельных возможностей конвективного и радиационного теплообмена при продольном течении газов с разными видами вставок и разной конструкции трубы. Однако надежность работы не повысилась, приводя к увеличению ремонтных и эксплуатационных затрат. В Казахстане долгое время не предпринимались попытки изменить конструкцию котла и улучшить тепловую эффективность. Водогрейные котлы известных зарубежных производителей, стоимость которых значительно выше отечественных, не достигают проектных показателей. Совокупность таких проблемных вопросов создает большой открытый дискуссионный вопрос о необходимости проведения модернизации, обеспечения экономичности работы старых котлов и соответствия ужесточающимся требованиям экологического законодательства.

Анализ состояния теплоэнергетического оборудования на рынке Казахстана, современные тренды по декарбонизации в теплоэнергетике, экологической стабильности и повышению энергетической эффективности показывает, что наиболее приемлемым является решение скорейшей замены устаревших водогрейных котлов современными котлами или модернизации конструкции котлов малой мощности с увеличением эффективности. Имеется определенный потенциал по модернизации водогрейных котлов малой мощности. Срок эксплуатации, которых не истек, а число часов наработки еще далеко от критического значения. Это наиболее реальный и привлекательный вариант с экономической и экологической точки зрения. Это позволит повысить технический уровень новых котлов снизить выбросы и экономить бюджетные средства на строительство новых котельных в перспективе.

Фактическое положение дел в отрасли показывает о неотложности мер по модернизации теплоэнергетического оборудования с малыми котлами, и продолжение новых разработок с надежными, экономичными системами с резким снижением выбросов парниковых газов т.е. создание параллельно альтернативные и доступные возобновляемые источники теплоснабжения в комплексе с водогрейными котельными. Предложенный подход, рассматриваемый в настоящей работе, подтверждают актуальность проводимого исследования по разработке высокоэффективных вариантов конструкций водогрейных котлов с возможностью применения

представляемых решений в качестве нового продукта, или их модернизации с улучшением всех технико – экономических и экологических показателей.

Представленная диссертационная работа выполнялась на базе комплекса научно-исследовательских аналитических и экспериментальных работ, с выполнением натурных экспериментов на производственной базе ТОО «Казкотлосервис», с анализом и оценкой эффективности технического решения с использованием реверсивных топок малых водогрейных котлов и спиральных вставок в конвективные трубы для увеличения надежности и экономичности. В диссертационной работе для повышения качества принятого инженерного решения, а именно изменения конструкции сопла горелки были использованы средства математического моделирования с использованием современных компьютерных технологий.

В связи с поставленными вопросами целью диссертационного исследования формулируется следующим образом:

Повышение тепловой эффективности водогрейного котла с реверсивной топкой с использованием спиралевидных проволочных вставок в конвективные трубы.

Исследование эффективности выдвижения сопла горелки для равномерного распределения факела по топочном объему в реверсивной топке.

Применение технических решений, исследованных в работе для действующих и для новых котлов.

В процессе выполнения диссертационной работы для реализации поставленной цели выполнялись следующие задачи исследования:

- Провести литературный обзор по интенсификации теплообмена в конвективных трубах и опыта эксплуатации существующих водогрейных котлов малой мощности.

- Выполнить аналитическое решение дифференциального уравнения теплопроводности для симметричной области цилиндрической реверсивной топки с целью определения поля температур по толщине стенки топки и сравнения с экспериментальными результатами теплотехнических испытаний.

- Провести экспериментальное исследование и сравнение тепловой эффективности котла ВВ-400 с реверсивной топкой и спиралевидными вставками в конвективных трубах с эффективностью котлов КВа-400, КВа-500 с использованием цилиндрического двусветного экрана и витыми ленточными вставками в конвективных трубах на специализированном стенде.

- Выполнить расчеты по определению сопротивления и теплоотдачи в конвективных трубах при использовании спиралевидных проволочных вставок и витых ленточных вставок;

- По результатам выполненных исследований и результатов теплотехнических испытаний предложить рекомендации по увеличению эффективности котла ВВ-400.

- Выполнить численное моделирование влияния эффективности выдвижения сопла горелки для равномерного распределения факела по топочному объему в реверсивной топке

- Принять непосредственное участие в теплотехнических испытаниях и корректировке рабочей документации водогрейного котла ВВ-400 и парового котла КПАЖ со спиралевидными проволочными вставками.

Научная новизна выполненной работы заключается в следующем:

1 По результатам экспериментальных данных разработаны рекомендации на водогрейные котлы ВВ-400 с проволочными спиралевидными вставками и витыми ленточными вставками.

2 Получены результаты аналитического решения дифференциального уравнения теплопроводности для определения поля температуры по толщине цилиндрической реверсивной топки. Результаты приближенного аналитического решения позволяют определять и оценивать уровень и поле температур по толщине стенки топки в зависимости от теплового радиационного потока на внутреннюю стенку топки. Определение интегральных температур сечения стенки топки (температурного поля) позволяет оценить поле напряжений, а знание предельных значений температуры внутренней стенки реверсивной топки, определить начало на внутренней стенке топки окалинообразования.

3 Получены зависимости температуры в пристеночной области топки от величины выдвижения сопла (тубуса) горелки на основе моделирования Ansys CFD. Варьирование длиной выдвижного сопла комбинированной горелки в реверсивной топке позволяет существенно увеличить длину факела с более равномерным распределением температуры и светимости факела вдоль оси по всей длине реверсивной топки.

4 По результатам теоретических и экспериментальных данных разработана техническая документация парового котла КПАЖ-6,5 со спиральными проволочными вставками.

Результаты диссертационной работы подтверждаются полученными охранными документами.

По результатам выполненных работ и исследований, на защиту выносятся следующие положения:

1 Результаты аналитического решения дифференциального уравнения теплопроводности применительно к цилиндрической реверсивной топке водогрейного котла ВВ тепловой мощностью 0,4 МВт с выдвижным соплом (тубусами) комбинированной горелки.

2 Результаты исследований гидродинамики (аэродинамики) и теплопередачи в конвективной части со спиралевидными вставками по теплотехническим испытаниям котла ВВ-400 и сравнение с аналогичными результатами для водогрейного котла КВа-400 и КВа-500 с ленточными вставками.

3 Корректировка конструкторской документации на водогрейный котел с реверсивной топкой ВВ-400 с использованием спиралевидных проволочных вставок в конвективных жаровых трубках.

4 Рабочая документация на жаротрубные паровые котлы с конвективными трубами и спиралевидными вставками производительностью пара до 6,5 т/час.

Результаты работ зафиксированы актом внедрения от производственного предприятия ТОО «Казкотлосервис».

Основные результаты диссертационной работы отражены в 15 научных публикациях и докладах МНТК, в том числе: 4 научные статьи в отечественных изданиях из списка рекомендованных ККСНВО; 6 научных докладов в сборниках в международных научно-технических конференций; 1 статья (Article) в журнале *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* индексируемая в базе данных Scopus с процентилем на момент публикации 55% по разделу «Общая энергетика» и 4 статьи в зарубежных журналах. В качестве соавтора результаты научно-исследовательской деятельности были зафиксированы в: 3 Патентах РК на изобретение по тематике конструкций водогрейных котлов.

Полученные результаты диссертационной работы имеют научную и практическую ценность, представленную следующими пунктами:

- По результатам комплексных экспериментальных исследований, подтвержденных аналитическим решением уравнения теплопроводности для реверсивной топки, получены температурные поля по толщине стенки топки, по которым можно оценить тепловую эффективность использования реверсивных топок. Подтверждены расчетные величины тепловосприятия по конвективной и радиационной части водогрейного котла, что может быть полезно в практическом использовании при расширении тепловой производительности такого типа котлов с реверсивной топкой и тем для исследований.

- По результатам комплексных экспериментальных исследований, определены коэффициент аэродинамического сопротивления и коэффициент теплоотдачи в конвективных трубках со спиралевидными проволоочными вставками и витыми ленточными вставками, которые позволяют производить весь комплекс тепловых расчетов по тепловосприятию конвективных труб и определять полное сопротивление котла, что позволит расширить тематику исследования.

- По результатам работ представлены варианты модификации конструкций водогрейного котла ВВ-400, которые можно применять для типовых моделей котлов, или использовать в качестве рабочей документации при проектировании новых котельных, проведении работ по повышению тепловой и экологической эффективности котельного оборудования.

- По результатам моделирования выдвижного сопла горелки в реверсивной топке, показана и описана целесообразность использования регулируемого сопла в реверсивной топке водогрейных и паровых жаротрубных котлах.

- Подготовлена рабочая документация на жаротрубные паровые котлы с конвективными трубами и спиралевидными вставками производительностью пара 6,5 т/час.

Достоверность полученных результатов подтверждается следующим:

1 Исследования проведены на действующих водогрейных котлах ВВ-400, КВа-400 и КВа-500 с использованием поверенных измерительных средств, внесенных в реестр ГСИ РК.

2 Экспериментальные работы выполнялись в соответствии с действующими требованиями, а результаты сравнивались с тепловыми расчетами по Нормативной методике.

3 Практическая ценность полученных экспериментальных и расчетных результатов подтверждается применимостью на действующих жаротрубных котлах, подтвержденным актом внедрения результатов диссертационной работы от котельного завода ТОО «Казкотлосервис».

Личный вклад автора в решении задач по исследуемой работе определяется:

- В постановке и формулировке задачи исследования и выборе методики исследования с применением головного образца водогрейного котла с реверсивной топкой тепловой мощностью ВВ-400 МВт;

- В постановке и аналитическом решении дифференциального уравнения теплопроводности Лапласа применительно к реверсивной цилиндрической топке для определения температурного поля по толщине металла стенки топки;

- Непосредственным участием на всех этапах теплотехнических испытаний и непосредственным исследованием (участие в теплотехнических измерениях и обработке данных) на стенде с действующими водогрейными котлами: ВВ-400, КВа-400 и КВа-500 на производственной базе ТОО «Казкотлосервис» г. Алматы).

- Корректировка конструкторской документации на водогрейный котел с реверсивной топкой ВВ-400 с использованием спиралевидных проволочных вставок в конвективных жаровых трубках.

- Участие в корректировке рабочей документации водогрейного котла ВВ-400 и серий парового котла КПАж с эффективной геометрией конструкций конвективных спиралевидных проволочных вставок по относительному шагу.

Диссертационная работа выполнена автором в соответствии с действующими требованиями оформления, структуры и содержания. Работа состоит из 5 основных разделов, списка условных обозначений и сокращений, введения, заключения, списка использованной литературы и приложения.

В первом разделе представлен обзор вопросов тепловой эффективности цилиндрических жаротрубных и водотрубных водогрейных котлов, а также преимуществ и существующих недостатков их конструкций. Представлено современное состояние по интенсификации теплообмена в конвективных трубах с выступами и спиралевидными вставками для использования с реверсивными топками. Поставлены цели и задачи исследования.

Во втором разделе приведено описание аналитического решения дифференциального уравнения теплопроводности с граничными условиями, применительно к реверсивной топке с целью определения температурного поля по толщине стенки. В разделе представлены профили температур по

результатам аналитического решения дифференциального уравнения в полярных координатах.

В третьем разделе приведено описание комплексного специализированного стенда для промышленных теплотехнических испытаний жаротрубного водогрейного котла ВВ-400 с реверсивной топкой и КВа-400, КВа-500 с двусветными экранами. Представлены технические средства для проведения экспериментов. Приведена методика проведения теплотехнических испытаний. Описана математическая модель и методика исследования экспериментальной модели топки с выдвижным соплом горелки.

Четвертый раздел содержит анализ результатов теплотехнических испытаний тепловой эффективности реверсивной топки со спиралевидными проволочными вставками в конвективных трубах. Полученные данные для котла ВВ-400 с реверсивной топкой сравниваются с результатами для цилиндрических водогрейных котлов серии КВа-400, КВа-500 по основным технико-экономическим показателям.

Представлены результаты расчетов спиралевидных вставок и витых ленточных вставок в конвективные трубы (коэффициент сопротивления ξ и коэффициент теплоотдачи α (Nu) в зависимости от угла φ закрутки ленты и шага спирали).

Приведено описание цилиндрической изотермической модели топки с реверсивной топкой для измерения поля температуры и скоростей в зависимости от длины выдвижения сопла комбинированной горелки.

В разделе приведены результаты компьютерного моделирования реверсивной топки со стандартной горелкой и с выдвижным соплом горелки.

Проведен анализ точности измерений.

В пятом разделе приведены рекомендации по повышению эффективности жаротрубных котлов с реверсивными топками на примере котла ВВ-400 и с описанием конструкции котла с рекомендациями по выдвижным соплам (тубусам) горелки. А также с учетом полученных данных представлены предложения для повышения эффективности и надежности работы парового жаротрубного котла КПАж с реверсивной топкой.

Представлена рабочая техническая документация на паровой котел КПАж.

В заключении работы приведено обобщение полученных результатов теплотехнических испытаний водогрейного котла ВВ-400 с реверсивной топкой и экспериментального исследования конвективной части со спиралевидными вставками в конвективные трубы с основными выводами по теме диссертационной работы.

В приложениях сведены в табличной форме решение уравнения теплопроводности для теплонапряженной цилиндрической стенки реверсивной топки котла ВВ-400, расчеты котла КПАж, копия акта внедрения от производственного предприятия ТОО «Казкотлосервис», копии патентов Республики Казахстан, список трудов, опубликованных по теме диссертации, фотографии с экспериментальной площадки.