

## АННОТАЦИЯ

диссертационной работы докторанта PhD по специальности 6D071700 – «Теплоэнергетика» Карманова А.Е. на тему «Исследование и разработка путей снижения термических напряжений в футеровках высокотемпературных агрегатов»

**Цель работы:** Снижение термических напряжений в футеровках высокотемпературных агрегатов за счёт рационализации процессов разогрева.

**Актуальность работы:** Состояние футеровки высокотемпературных агрегатов определяет надежность и экономичность их работы, в связи с чем, повышение стойкости футеровок за счёт снижения термических напряжений – актуальная задача, решение которой невозможно без изучения механизма термического разрушения и точных данных о тепломеханических свойствах материалов во всём диапазоне используемых температур.

**Новизна научных исследований заключается в следующем:**

- Разработан и защищен патентом способ термомеханических испытаний огнеупорных материалов футеровок высокотемпературных агрегатов;

- Получены экспериментальные данные о зависимости предела прочности ряда огнеупоров (периклазоуглерода, шамота, диатомита) от температуры;

- Рационализированы графики разогрева футеровок высокотемпературных агрегатов с учётом зависимости предела прочности огнеупоров от температуры.

- Разработан и защищен патентом способ определения теплового состояния футеровки теплового агрегата.

**Значение научных результатов для теории и практики.** Рационализация графиков разогрева футеровок высокотемпературных агрегатов с учетом зависимости предела прочности от температуры позволяет увеличить срок службы футеровок

**Задачи исследования:**

- Выполнить анализ тепловой работы высокотемпературных агрегатов.

- Усовершенствовать способ термомеханических испытаний материалов для условий повышенных температур.

- Провести экспериментальные исследования зависимости предела прочности на сжатие огнеупорных материалов используемых в высокотемпературных агрегатах от температуры.

- Разработать математическую модель теплового состояния футеровок высокотемпературных агрегатов.

- Разработать методику и компьютерную программу для расчета температурных напряжений и скоростей разогрева футеровок высокотемпературных агрегатов.

- Рационализировать графики разогрева футеровок высокотемпературных агрегатов с учётом зависимости предела прочности огнеупоров от температуры.

- Рационализировать способ определения температурных полей в футеровках высокотемпературных агрегатов.

- Разработать рекомендации по совершенствованию температурных режимов высокотемпературных агрегатов.

В диссертационной работе выполнен анализ теоретических и практических методов исследования рациональных режимов процесса разогрева высокотемпературных агрегатов, построения математической модели термонапряжённого состояния футеровок.

Разработан и защищен патентом способ термомеханических испытаний огнеупорных материалов футеровок высокотемпературных агрегатов. На основании данных разработок была разработана и создана экспериментальная установка по определению прочности материалов при повышенных температурах. На экспериментальной установке были проведены исследования по определению предела прочности на сжатие различных материалов при повышенных температурах материала.

Для создания модели были использованы методы математического моделирования, которые широко применяются для исследования температурных полей в теплотехнологических агрегатах. В качестве граничных условий для рассматриваемых высокотемпературных агрегатов приняты следующие: на внутренней и внешней поверхности футеровки - граничные условия 3 рода (температура греющей среды). Начальные условия – задание температуры по сечению футеровки.

Для решения полученного уравнения теплопроводности с начальными и граничными условиями используем численные методы решения – шеститочечную неявную схему Кранка-Никольсона.

Для адаптации разработанной математической модели элементов футеровки ВТА был разработан исследовательский стенд. На стенде можно производить исследования по распределению температуры в образцах огнеупорных и теплоизоляционных материалов с помощью контрольно-измерительной аппаратуры с достаточной степенью точности измерений.

Проведённые исследования показывают, что погрешность определения температуры по сечению футеровки в процессе разогрева в соответствии с разработанной методикой не превышает 6 %, что говорит о возможности использования данной методики в промышленных условиях.

Для определения теплового состояния футеровки (обмуровки) в заводских условиях с учётом специфики действующего оборудования был разработан и защищен патентом «Способ определения теплового состояния футеровки теплового агрегата», позволяющий посредством замера косвенных показателей определять температурные поля футеровки агрегата в условиях эксплуатации.

Были рассмотрены и проанализированы три способа разогрева высокотемпературных агрегатов:

- максимально возможное повышение температуры с начального этапа с дальнейшим снижением скорости разогрева;
- равномерный разогрев до требуемой температуры с постоянной скоростью на протяжении всего времени;
- первоначальный разогрев с минимальными скоростями и дальнейший разогрев максимальными скоростями.

Доказано, что разогрев футеровки по первому варианту наиболее рационален по затратам времени.

Произведены замеры температур футеровки на действующем оборудовании (сталеразливочный ковш и печь спекания) и рационализированы графики существующего процесса разогрева оборудования. Показано, что значения термических напряжений превышают предел прочности для используемых огнеупорных материалов.

Рационализированные графики разогрева рассмотренных высокотемпературных агрегатов (25-тонного сталеразливочного ковша и печи спекания) позволяют вести процесс разогрева без превышения предела прочности используемых огнеупорных материалов и сократить процесс разогрева на 1 ч 30 мин – для сталеразливочного ковша; на 8ч– для печи спекания.

#### **Личный вклад соискателя состоит в:**

- в анализе и обобщении литературных данных;
- в проведении математического моделирования;
- в планировании, организации и проведении экспериментальных исследований, обработке и обобщении результатов;
- в разработке экспериментальных стендов для проведения исследования;
- в разработке новых технических решений.
- в проведении адаптаций математической модели на разработанном стенде;

#### **Апробация результатов диссертации.**

Основные результаты работы были представлены и обсуждены на международных научно-практических конференциях и форумах:

- научный форум с международным участием «IV Балтийский морской форум» (Россия, г. Калининград, 2016);
- I международная научно-практическая конференция «Современные тенденции котлостроения» (Россия г. Барнаул, 2017);
- XI международная научно-практическая конференция «Наука технология инновации» (Россия, г. Новосибирск, 2017);
- международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы энергетики» (Россия, г. Омск, 2017);
- XI Международная научно-практическая конференция «DynamicsofSystems, MechanismsandMachines» (Россия, г.Омск, 2018).

**Публикации.** Основные положения работы представлены в 20 публикациях, в том числе в 5 изданиях, рекомендованных ККСОН МОН РК, 2 в журнале «GlassandCeramics», входящем в базу данных ThomsonReuters, 1 в журнале «DynamicsofSystems, MechanismsandMachines» входящих в базу данных Scopus, 2 в зарубежном журнале «Стекло и керамика» в 10 международных научно-практических конференциях и форумах, 2 патентах.

**Объем и структура.**

Диссертация содержит введение, обозначения и сокращения 5 разделов, заключение, список использованной литературы, 3 приложения. Диссертация изложена на 113 страницах компьютерного набора, включая 52 рисунков и 14 таблиц, список литературы из 62 наименований.

**Во введении** раскрыта актуальность научной работы, конкретизирована исследуемая проблема. Приведены основная идея, научная новизна, значение научных результатов для теории и практики, а также апробация результатов и публикации.

**В первом разделе** диссертации представлен обзор и анализ состояния в области развития высокотемпературных агрегатов. Рассмотрены технологические характеристики ВТА и методика исследования тепловой работы, долговечность и эффективность работы этих агрегатов в зависимости от футеровок. Рассмотрены применяемые в агрегатах виды огнеупорных и теплоизоляционных материалов, а также факторы, влияющие на работу огнеупорных материалов. Дан анализ термостойкости используемых огнеупорных изделий. Согласно поставленной цели сформулированы задачи исследования.

**Во втором разделе** рассматриваются пусковые операции, необходимые условия разработки и реализации эффективных пусковых режимов. Приведена динамика сушки образцов огнеупорных материалов. Проведён анализ превышения термических напряжений в футеровках высокотемпературных агрегатов.

**В третьем разделе** приведены экспериментальные исследования теплофизических характеристик огнеупорных и теплоизоляционных материалов. Для этих исследований возникла необходимость в экспериментальном определении предела прочности при комнатной и повышенной температуре. Для чего была разработана и создана экспериментальная установка по определению прочности материалов при повышенных температурах. На этой установке были проведены исследования по определению предела прочности на сжатие различных огнеупорных материалов при повышенных температурах материала: периклазоуглерода, диатомита и шамота.

Автором был разработан способ и получен патент на «Способ термомеханических испытаний материалов», где для повышения точности измерений реализуется способ термомеханических испытаний материалов, который позволяет определить предел прочности материалов на сжатие при

повышенных температурах образца с применением устройства, позволяющего определить температуру материала прямым методом.

На экспериментальном стенде были проведены исследования по определению предела прочности на сжатие различных материалов при повышенных температурах материала. Кривая зависимости предела прочности периклазоуглеродистых огнеупоров от температуры имеет следующие тенденции: начиная с температуры  $\sim 90$  °С предел прочности огнеупора растёт, доходя до значения 51,2 МПа (при температуре  $\sim 200$  °С), затем значение предела прочности начинает плавно снижаться, доходя до 40 МПа (при  $\sim 400$  °С).

Кривая зависимости предела прочности диатомита от температуры имеет следующие тенденции: начальное значение предела прочности материала 6 кгс/см<sup>2</sup>, что ниже заявляемого заводом-изготовителем. С повышением температуры практически сразу начинается рост предела прочности, который при 100 °С соответствует официально заявляемому (6 кгс/см<sup>2</sup>) и достигает максимума при температуре 450-500 °С (13 кгс/см<sup>2</sup>).

При температуре 20 °С предел прочности на сжатие шамотного огнеупора составляет 20 МПа, а при 600 °С предел прочности равен уже 40 МПа.

Расчет определения погрешности измерений прочности материала показал, что погрешность не превышает 4%.

**В четвертом разделе** представлена математическая модель теплового состояния ВТА. Для создания модели были использованы методы математического моделирования, которые широко применяются для исследования температурных полей в теплотехнологических агрегатах. В качестве граничных условий для рассматриваемых высокотемпературных агрегатов приняты следующие: на внутренней и внешней поверхности футеровки - граничные условия 3 рода (температура греющей среды). Начальные условия – задание температуры по сечению футеровки.

Для решения полученного уравнения теплопроводности с начальными и граничными условиями используем численные методы решения – шеститочечную неявную схему Кранка-Никольсона.

С учётом принятых допущений была получена формула для температурных напряжений

$$\sigma = -E \cdot \alpha \cdot (T_2 - T_1)$$

Для удобства пользования разработанной методикой была разработана блок-схема и компьютерная программа. Исходный код программного обеспечения, разработанного в среде Delphi, написан на языке ObjectPascal.

Для адаптации разработанной математической модели элементов футеровки ВТА был разработан исследовательский стенд. На стенде можно производить исследования по распределению температуры в образцах

огнеупорных и теплоизоляционных материалов с помощью контрольно-измерительной аппаратуры с достаточной степенью точности измерений.

Проведённые исследования показывают, что погрешность определения температуры по сечению футеровки в процессе разогрева в соответствии с разработанной методикой не превышает 6 %, что говорит о возможности использования данной методики в промышленных условиях.

Для определения теплового состояния футеровки (обмуровки) в заводских условиях с учётом специфики действующего оборудования был разработан «Способ определения теплового состояния обмуровки котла» и была подана заявка на полезную модель.

**В пятом разделе** приведены исследования теплонапряжённого состояния высокотемпературных агрегатов. Исследование процесса нагрева футеровки сталеразливочного ковша показали, что при разогреве футеровки в нем возникли термические напряжения как сжатия, так и растяжения, которые превышают предел прочности на сжатие и растяжение периклазоуглерода. Прослеживается чёткая взаимосвязь между скачками температуры и скачками возникающих напряжений.

Существующий процесс разогрева футеровки сталеразливочного ковша является критическим по возникающим температурным напряжениям. В процессе разогрева на графике по напряжениям сжатия (рисунок 42) выделяются два периода времени, температурные напряжения в которых превышают допустимые (0ч 20м – 3ч 10м; 5ч 10м – 8ч 40м); на графике по напряжениям растяжения также имеется два периода (0ч 30м – 3ч 00м; 5ч 00м – 8ч 30м).

При анализе процесса разогрева печи спекания, в котором в футеровке используется в качестве огнеупорного материала шамотный кирпич марки ШЦУ было определено, что напряжения при разогреве также превышают предел прочности, но более значительную роль (по продолжительности) играют напряжения растяжения.

Режимы разогрева рассматриваемого оборудования были рационализированы по критерию – возникающим температурным напряжениям. Полученные в результате рационализированные графики разогрева рассмотренных высокотемпературных агрегатов (25-тонного сталеразливочного ковша и печи спекания) позволяют вести процесс разогрева без превышения предела прочности используемых огнеупорных материалов и сократить процесс разогрева на 2 ч. – для сталеразливочного ковша; на 2 ч 20 мин – для печи спекания.

**В заключении** отражены основные результаты и выводы по диссертационной работе.