

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 679.743.2 (574)

На правах рукописи

Л.В. Кармишина

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
АГРЕГАТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Магистерская диссертация на соискание
академической степени магистра технических наук
по специальности 6М071700 – Теплоэнергетика

ПАВЛОДАР – 2014

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Инновационный Евразийский университет

Допущен (а) к защите:
зав. кафедрой «Энергосберегающие
технологии»,
кандидат технических наук,
_____ А.К.Кинжибекова
(подпись)
«___» _____ 2014 г

Магистерская диссертация

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
АГРЕГАТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

специальность: 6М071700 – Теплоэнергетика

Магистрант _____ Л.В. Кармишина

Научный руководитель,
кандидат технических наук, _____ А.К. Кинжибекова

ПАВЛОДАР – 2014
СОДЕРЖАНИЕ

	НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	
	ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	
	ВВЕДЕНИЕ	5
1	Обзор существующих и перспективных теплоизоляционных материалов	7
1.1	Общая характеристика и классификация тепловой изоляции применяемой при эксплуатации высокотемпературных агрегатов	7
1.2	Состояние вопроса	19
2	Анализ влияния условий работы высокотемпературных агрегатов на основные характеристики теплоизоляционных материалов	22
2.1	Основные характеристики теплоизоляционных материалов	22
2.2	Условия работы высокотемпературных агрегатов	28
2.2.1	а теплоэнергетического оборудования	28
2.2.2	а металлургических печей	35
2.3	Влияние высоких температур на теплофизические свойства теплоизоляционных материалов	40
2.3.1	Общие понятия	40
2.3.2	Влияние объемной массы и размера пор на теплопроводность тепловой изоляции.	41
2.3.3	Влияние толщины волокон на коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов	46
2.3.4	Влияние температуры на коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала	48
3	Экспериментально-исследовательская часть	51
3.1	Экспериментальные исследования влияния температуры процесса на плотность теплоизоляционного материала	51
3.1.1	Этапы проведения работы	52
3.1.2	Обработка результатов эксперимента	58
3.2	Планирование эксперимента по определению теплопроводности	61
3.2.1	Обработка результатов эксперимента	64
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	69
	Приложение А	72
	Приложение Б	73

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей магистерской диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 4640-2011 Вата минеральная. Технические условия
2. ГОСТ 9573-2012 «Плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем теплоизоляционные»;
3. ГОСТ 21880-94 «Маты прошивные из минеральной ваты теплоизоляционные»;
4. ГОСТ 22950-95 «Плиты минераловатные повышенной жесткости на синтетическом связующем. Технические условия»;
5. ГОСТ 21880-2011 «Маты из минеральной ваты прошивные теплоизоляционные. Технические условия»
6. ТУ 5769-001-73902414-2005 «Мат прошивной из базальтового волокна»

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей магистерской диссертации использованы обозначения и сокращения:

млн. т. усл. топлива – миллион тонн условного топлива;

США – Соединенные Штаты Америки;

ТЭЦ– теплоэлектроцентраль;

ГПЗ – газоперерабатывающий завод;

мкм – микрометр;

БСТВ - базальтовое супертонкое волокно;

ЗАО – закрытое акционерное общество;

БТВ – базальтовое тонкое волокно;

ТЭС – тепловая электростанция;

тыс. тонн – тысяч тонн;

1 Обзор существующих и перспективных теплоизоляционных материалов

1.1 Общая характеристика и классификация тепловой изоляции применяемой при эксплуатации высокотемпературных агрегатов

Одним из важнейших путей экономии топливно-энергетических ресурсов является минимизация тепловых потерь через ограждающие конструкции зданий, сооружений, технологического оборудования, теплопроводов. По приближенным оценкам, реализация достижений научно-технического прогресса в этой области может обеспечить к 2014 г. экономию 40 млн. т усл. топлива при ежегодном потреблении первичных энергоресурсов в стране 1300 - 1500 млн. т [1].

Известно, что до 80 – 85% энергоносителей в промышленно развитых странах расходуется в промышленности и энергетике при эксплуатации промышленных печей, термического и энергетического оборудования. Поэтому в настоящее время задача экономии энергоресурсов, особенно, в энергоемких отраслях промышленности: металлургии, машиностроении, химической промышленности, на предприятиях, производящих строительные материалы и керамику, в энергетике стоит необычайно остро и актуально [1].

Приоритетным направлением политики энергосбережения является использование высокотехнологичной промышленной изоляции. Подсчитано, что каждый уложенный в дело 1 м³ теплоизоляции обеспечивает в среднем экономию 1,45 т усл. топлива в год [1].

Тепловая изоляция промышленных сооружений и оборудования (в т.ч. трубопроводов) в теплоэнергетике - котлы, паровые и газовые турбины, высотные дымовые трубы высотой 190-350 м, резервуары для хранения жидкого топлива, сжиженных природных и углеводородных газов, газгольдеры и др.; в промышленности строительных материалов, химической и нефтегазоперерабатывающей, металлургической, пищевой и других отраслях промышленного производства - печи, сушила, аппараты колонного типа, холодильники и т.д., получила собирательное название промышленной изоляции [2].

Отличительной особенностью промышленной тепловой изоляции является широкий температурный диапазон изолируемых поверхностей от -180 до 600 °С и высокий уровень теплового потока через них, который в 10-15 раз превышает уровень теплового потока через тепловую изоляцию жилых, общественных и промышленных зданий [3].

Если рассматривать объемы применения изоляционных материалов в зависимости от температуры изолируемых поверхностей (Рисунок 1.1), то около 25 % применяемой промышленной изоляции работает при температурах от +200°С до +400°С, а пять процентов изоляции работает в

пределах температур от +400°C до +600°C, свыше +600°C работает всего 0,1% изоляции [4].

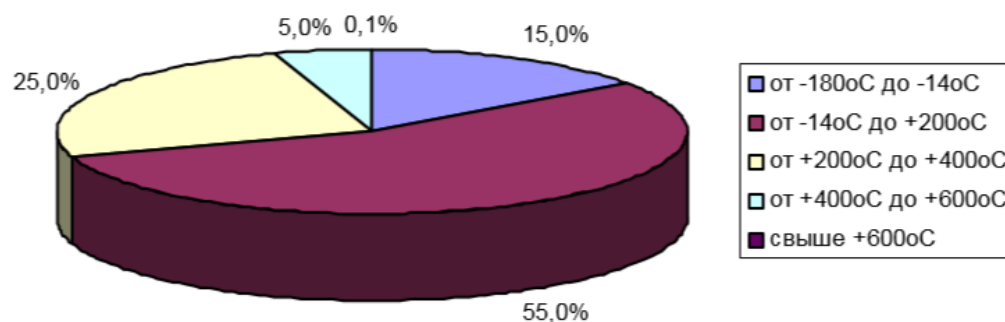


Рисунок 1.1–Объемы применения изоляционных материалов

Подавляющая часть (85-90%) промышленной тепловой изоляции монтируется из волокнистых материалов (минераловатные и стекловолокнистые изделия) [3]. При этом более 55% изоляции работает на объектах с температурой тепловой изоляции до 200 °C, около 25% в температурном интервале 180-400 °C, 5% в пределах 401-600 °C, только 0,1% тепловой изоляции монтируется из неорганических формованных изделий на объектах с температурой выше 600 °C [5], 15% при отрицательной температуре от -14 °C до -180 °C.

Согласно данным таблицы 1.1. можно сделать вывод, что преобладающий объем на рынке занимают волокнистые теплоизоляционные материалы [3].

Таблица 1.1 – Теплоизоляционные материалы и области их применения в промышленной изоляции

[illegible]

[illegible]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
8. Горючесть	Неро- рочный	Неро- рочные	Неро- рочные	Неро- рочные	Неро- рочные	Неро- рочные	марка 75, 100 несто- рочные марка 150, 200 - горю- чие	Неро- рочные	Неро- рочные	Неро- рочные	Неро- рочные	Неро- рочные	Неро- рочные (груд- ного- рочные)	Неро- рочные	Неро- роч- ные	Неро- рочные	Неро- рочные			Неро- рочный	Труд- ного- рочные	Труд- ного- рочные	Горю- чие; Труд- ного- рочный -рипор, ППУ- 331/3М - не рас- простра- няется	Горю- чий	

Минераловатные теплоизоляционные материалы занимают доминирующее положение в общем объеме производства. Такое положение сохранится на обозримую перспективу. Это объясняется большим числом действующих предприятий, универсальностью минераловатной продукции, недостижимым для других материалов (кроме стекловолокнистых) разнообразием изделий, которые можно получать из минеральной ваты, широким интервалом средней плотности (от 25 до 400 кг/м³) и широким температурным интервалом применения (от -160 до +800 °С) [1]. К этому следует добавить повсеместно распространенную сырьевую базу, сравнительно низкие капитальные затраты и производственные издержки на 1 м³ продукции. В промышленно развитых странах Европы, например во Франции, в Финляндии, Швеции, Дании, доля волокнистых теплоизоляционных материалов также составляет 60-70 % общего объема их производства [1].

В Казахстане же износ активной части основных фондов по производству минераловатных изделий достигает 60-70%. На абсолютном большинстве предприятий эксплуатируется технологическое оборудование образца начала 60-х - конца 70-х годов. Удельные энергозатраты на 20— 30 % выше, чем в современных зарубежных технологиях. Выпускаемая продукция - преимущественно плитные и рулонные (прошивные маты). Это материалы с весьма ограниченным диапазоном размеров и плотности. Фасонные изделия (цилиндры, полуцилиндры) вообще не производят [8].

Таблица 1.2 - Объем выпуска теплоизоляционных материалов, м³ на 1000 жителей

Страна	Объем выпуска теплоизоляционных материалов, м ³ на 1000 жителей. Всего	Волокнистых
США	496	238
Швеция	600	240
Финляндия	416	200
Япония	350	200
Россия	87	62

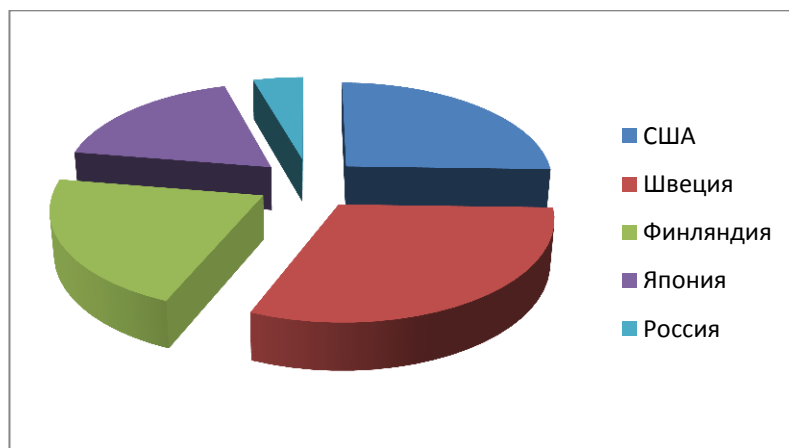


Рисунок 1.2 – Диаграмма объема выпуска теплоизоляционных материалов в разделе стран мира

Согласно данным агентства статистики Республики Казахстан прирост производства шлаковаты, ваты минеральной силикатной и ваты минеральной аналогичной (включая их смеси), в блоках, листах или рулонах (единица измерения в тоннах) на период с 2008 по 2012г. составил 21722 тонн [9].

Таблица 1.3 - Выпуск минераловатных изделий в Республике Казахстан в период с 2008 по 2012гг

Вид выпускаемой продукции	Период				
	2008	2009	2010	2011	2012
Шлаковата, вата минеральная силикатная и вата минеральная аналогичная (включая их смеси), в блоках, листах или рулонах, тонн	20 833	28 268	24 365	11 836	42 555

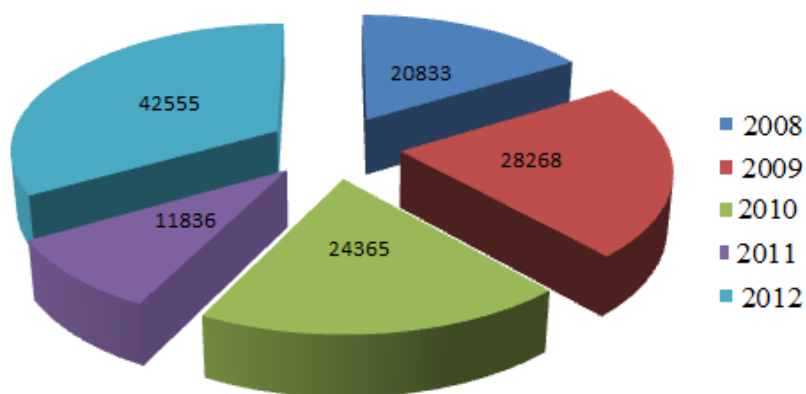


Рисунок 1.3 - Выпуск минераловатных изделий в Республике Казахстан в период с 2008 по 2012гг

Таблица 1.4 - Объем выпуска минераловатных изделий в разрезе областей Казахстана

Область	Период, год				
	2008	2009	2010	2011	2012
Актюбинская	936	4615	0	3603	12601
Алматинская	601	550	195	998	1434
Западно-Казахстанская	279	0	276	121	2
Карагандинская	4	34	38	931	4825
Южно-Казахстанская	8	12	0	0	0
Павлодарская	5865	5777	4328	5214	5438
Восточно-Казахстанская	11663	17127	19358	0	17415
г. Алматы	1477	153	170	969	840

Выпуск минераловатных изделий в разрезе областей Казахстана можно проследить по диаграмме (Рисунок 1.5).

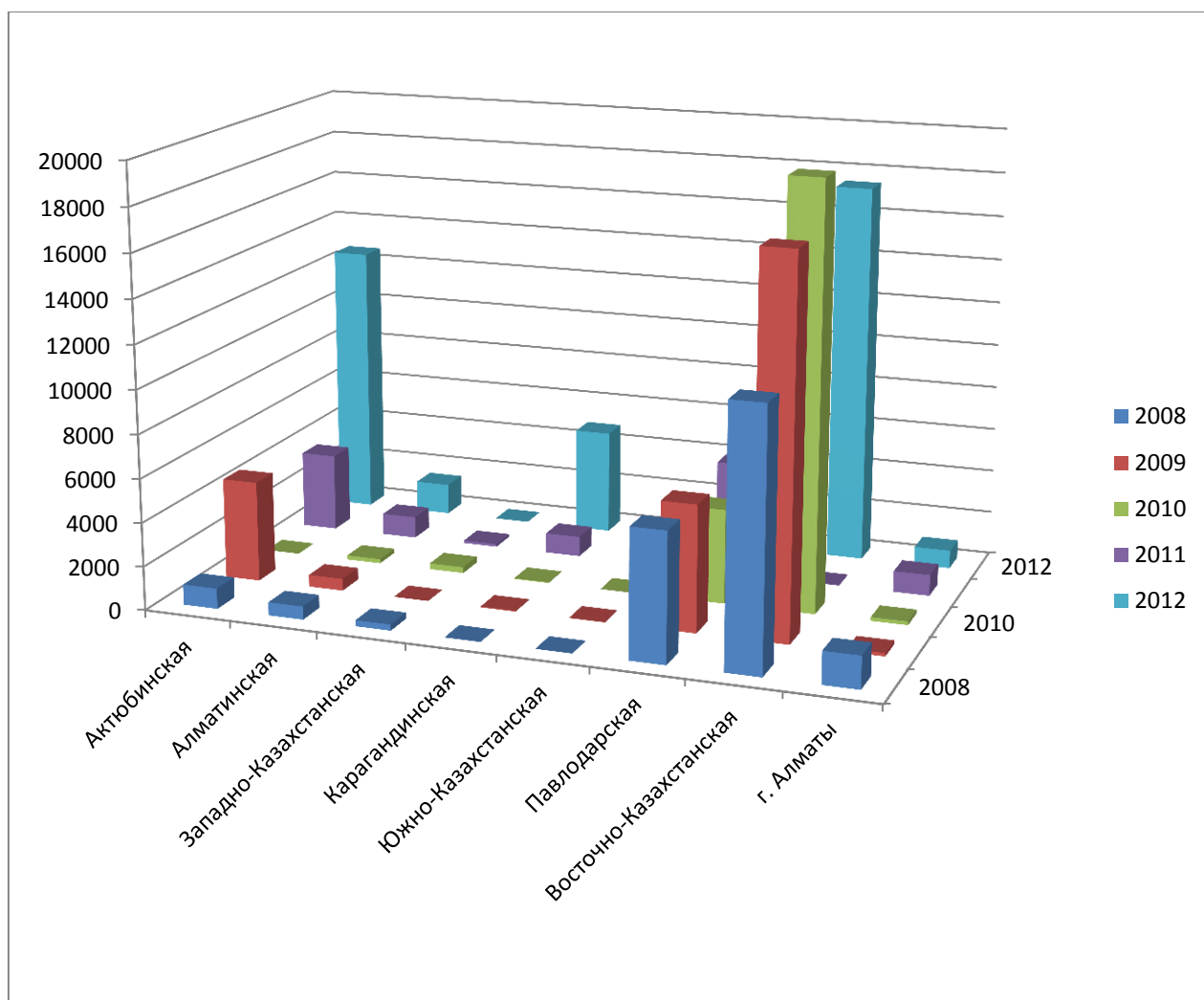


Рисунок 1.5 – Диаграмма выпуска шлаковаты, ваты минеральной силикатной и ваты минеральной аналогичной (включая их смеси), в блоках, листах или рулонах (единица измерения в тоннах) в разрезе областей Казахстана в период с 2008 по 2012гг

Низкое качество и ограниченная номенклатура минераловатных изделий делают их неконкурентоспособными на внешнем рынке. Более того, высококачественная продукция из Швеции, Финляндии, Германии и других стран начинает вытеснять отечественную на престижных объектах, в том числе в частном строительстве [1].

Одним из комплексных направлений решения задачи энергосбережения, позволяющего существенно снизить энергопотребление при эксплуатации парка печей и термического оборудования, является применение волокнистых футеровочных и теплоизоляционных материалов.

Волокнистые материалы - это материалы нового поколения, которые сочетают в себе высокотемпературные, огнеупорные и изоляционные свойства, низкую теплопроводность и малоинерционность, что позволяет широко

применять их вместо традиционных материалов для футеровки практически всего парка термического оборудования. Основой для производства волокнистых материалов являются муллитокремнеземистые и базальтовые волокна с применением высокотемпературных неорганических связующих [10].

Современные волокнистые теплоизоляционные материалы изготавливаются из сверхтонких волокон, получаемых в результате плавления песка, соды, известняка, базальтовых пород или вторично используемого стекла. Из базальтовых пород или стекломассы при температуре 1500°C путем центрифугирования расплавленного сырья или методом вытягивания получают волокна [11, 12]. Одновременно добавляют связующие вещества. В качестве связующих в основном применяются фенолформальдегидные смолы, а для высокотемпературной технической изоляции связующее не используют. Процент связующего колеблется в зависимости от требуемой прочности изделия.

Волокна ваты прочно удерживают воздух, который составляет 98% от массы изделия и является отличным теплоизолятором. Структура волокон в изделии может быть продольной, вертикальной и смешанной ориентации. С точки зрения теплоизоляционных свойств наиболее эффективна смешанная структура волокна, дающая возможность повысить технико-эксплуатационные параметры при одновременном снижении веса изделий. Волокнистая теплоизоляция может выпускаться в виде рыхлой ваты, прошивных матов, полужестких и жестких плит, скорлуп для труб [11].

Все волокнистые материалы обладают эластичностью, малой кажущейся плотностью и малой теплопроводностью, трещиноустойчивостью, значительной прочностью на разрыв и на изгиб (особенно мягкие и полужесткие), термостойкостью. Основные характеристики волокнистых огнеупорных и теплоизоляционных материалов представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5- Характеристики волокнистых огнеупорных и теплоизоляционных материалов

Наименование	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Максимальная температура применения, °C	Теплопроводность, Вт/м при температуре				
			100°C	400°C	700°C	1000°C	1200°C
Муллитокремнеземистый войлок	200	1150	0,07	0,12	0,17	0,33	0,53
Муллитокремнеземистая плита	450	1260	0,09	0,17	0,22	0,30	0,43
Маты базальтовые АТМ-10Т*	65	700	0,049	0,104	0,174	---	---
Плиты базальтовые из БСТВ*	140	700	0,047	0,095	0,155	---	---
Плиты базальтовые из БТВ**	240	700	0,052	0,120	0,171	---	---

Примечания:

*- материалы из супертонкого базальтового волокна с диаметром волокон 1 – 3 мкм.

** - материалы из тонкого базальтового волокна с диаметром волокон 6 – 9 мкм.

Тепловая изоляция нашла широкое применение в футеровке металлургических печей, благодаря чему уменьшается тепловой поток из зоны высоких температур.

Наряду с малой теплопроводностью и низкой удельной теплоемкостью теплоизоляция должна обладать достаточной огнеупорностью и температурой начала размягчения под нагрузкой, а также строительной прочностью. Но следовательно материал к которому предъявляют высокие требования по сопротивлению к воздействию высоких температур, неизбежно должен быть высокоплотным и малопористым, и следовательно, он будет обладать невысокими теплоизолирующими свойствами [13].

Поэтому футеровка современных металлургических печей выполняется двухслойной, а иногда трехслойной [13].

Теплоизоляционные материалы, применяемые в металлургических печах можно разделить следующим образом[14]:

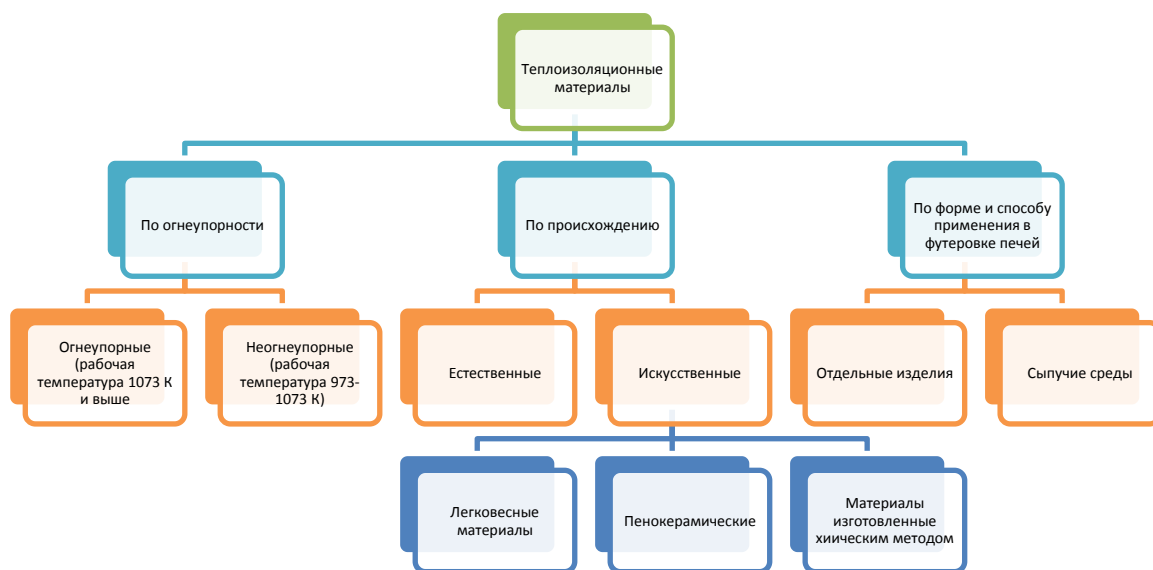


Рисунок 1.6 – Классификация теплоизоляционных материалов для футеровки металлургических печей

Как отмечалось выше, в некоторых видах промышленных сооружений тепловая изоляция, выполняя свою традиционную роль - снижение потерь тепловой энергии в окружающую среду, обеспечивает такие температурные режимы конструктивных элементов сооружений в процессе их эксплуатации, соблюдение которых обеспечивает их работоспособность и долговечность [14].

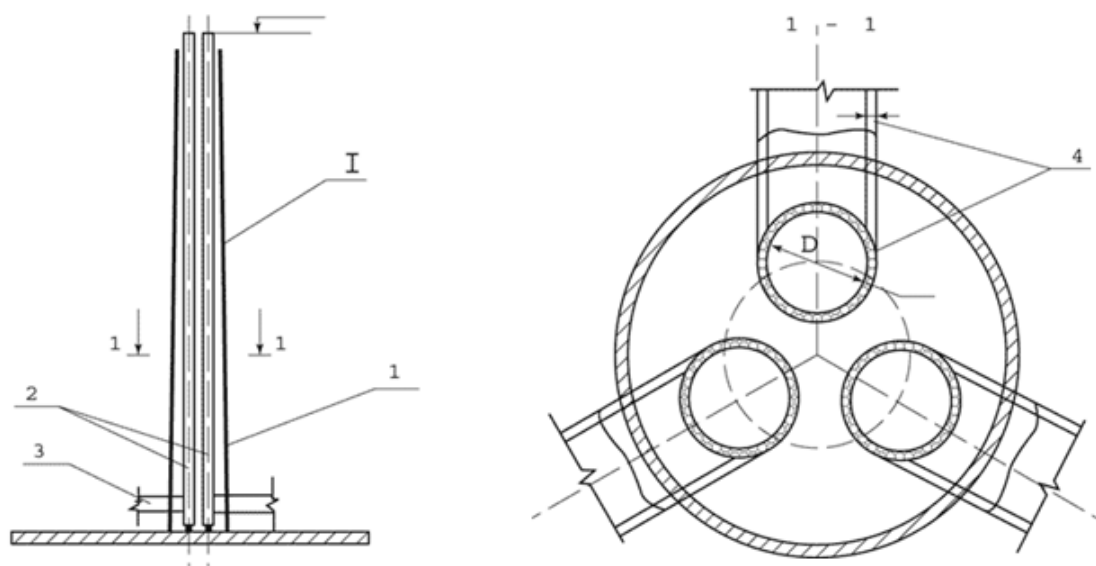
К такому типу сооружений относятся дымовые трубы тепловых электростанций и промышленных предприятий.

Дымовые трубы являются сложными инженерными сооружениями, проектирование, строительство и эксплуатация которых требует комплексного

решения большого количества технических задач, в том числе задачи эффективной тепловой изоляции несущих конструкций.

В конструкциях железобетонных труб с металлическими газоотводящими стволами, в свободно стоящих металлических трубах и трубах в металлическом каркасе теплоизоляционный слой предусматривается по наружной поверхности металлических стволов (рисунок 1.7) [15].

Тепловая изоляция металлических стволов является весьма ответственным элементом конструкции дымовой трубы, снижающим тепловые потери через стенки трубы, предотвращающим выпадение конденсата из отходящих газов на внутренней поверхности металлических стволов и ограничивающим развитие коррозионных процессов при воздействии химически агрессивных веществ на внутреннюю поверхность металлического ствола. Так, по СП 13-101-99 тепловая изоляция оголовка железобетонных дымовых труб с газоотводящими стволами из металла снижает скорость коррозии металла в 4-6 раз по сравнению с неизолированными оголовками. Принципиальные технические решения и проекты тепловой изоляции дымовых труб для Костромской ТЭЦ, Астраханского ГПЗ, Карагандинского МК, Норильского НХК, Кишиневской ТЭЦ, ТЭЦ-11, ТЭЦ-23, ТЭЦ-25 "Мосэнерго", Северной ТЭЦ "Мосэнерго", объектов в Индии, Иране, Ираке и др. разработаны институтом "Теплопроект" в 1975-1995 годах [3]. В 1999-2000 годах институтом разработаны проекты реконструкции дымовых труб с газоотводящими металлическими стволами, включая проекты реконструкции тепловой изоляции для Костромской ТЭЦ и Астраханского ГПЗ.



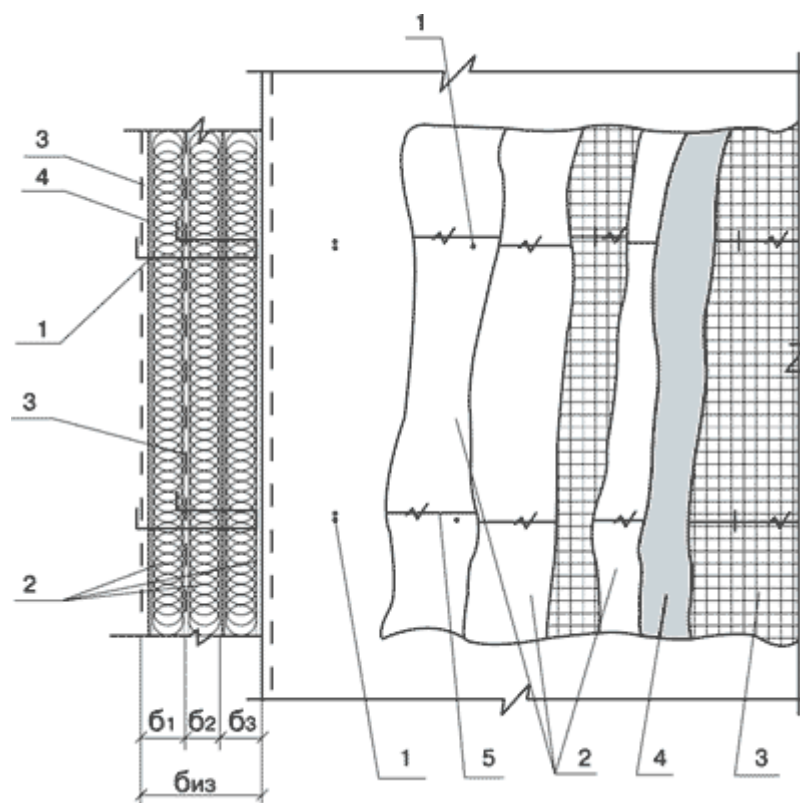
1 – железобетонный столб; 2 – металлический газоотводящий ствол; 3 – газоход; 4 – теплоизоляционная конструкция

Рисунок 1.7 - Железобетонная труба с тремя внутренними металлическими стволами

Институтом «Теплопроект» (сегодня АО «Теплопроект») разработаны многослойные конструкции тепловой изоляции металлических стволов дымовых труб. Конструкция включает теплоизоляционный слой, защитное

покрытие и узлы системы крепления теплоизоляционного слоя на приварных элементах – скобах и штырях с уплотнением металлическими бандажами и струнами [15].

С учетом номенклатуры выпускаемых промышленностью теплоизоляционных минераловатных матов и плит, максимальная толщина которых составляет 80–100 мм, конструкции тепловой изоляции газоотводящих металлических стволов выполняются, как правило, трехслойными (Рисунок 1.8).



1 – штырь; 2 – плиты теплоизоляционные минераловатные; 3 – сетка плетеная металлическая; 4 – стеклоткань; 5 – кольцо проволоочное

Рисунок 1.8 - Трехслойная теплоизоляция газоотводящего металлического ствола с закреплением на двойных штырях с применением уплотняющих проволоочных колец

1.2 Состояние вопроса

Являясь одной из ведущих держав мира по производству энергии, Казахстан значительно уступает экономически развитым странам в вопросах рационального использования энергоресурсов.

Анализ опыта различных стран в решении проблемы энергосбережения показывает, что одним из наиболее эффективных путей ее решения является сокращение потерь тепла через ограждающие конструкции зданий, сооружений, промышленного оборудования, тепловых сетей. В этой связи обращает на себя внимание интенсивное развитие в рассматриваемых странах теплотехнического строительства и промышленности теплоизоляционных материалов. В некоторых странах, таких например как Швеция, Финляндия, Германия, США и других, объем выпуска теплоизоляционных материалов на душу населения в 5-7 раз превышает этот показатель для Казахстана.

Перед промышленностью теплоизоляционных материалов современное энергоэффективное строительство ставит много проблем, связанных с улучшением качества и расширением номенклатуры продукции. Это - перевод заводов минеральной ваты на сырье из горных пород, улучшение качества волокна путем совершенствования плавильных агрегатов и узлов раздува расплава, оснащение заводов современными камерами полимеризации. Над этим работают и заводы и "Теплопроект" [16].

Необходимым условием снижения тепловых потерь в промышленности и строительстве является обеспечение стабильности теплозащитных свойств и физической целостности теплоизоляционных конструкций в процессе их эксплуатации.

Известно, что тепловая изоляция промышленного оборудования работает в зоне высоких температур. А на теплопроводность теплоизоляционных материалов оказывает влияние большое количество факторов.

Изучение теплопроводности материалов представляет собой одну из актуальнейших задач современной техники. Одним из родоначальников в области изучения теплопроводности изоляционных материалов стал профессор Петербургского технологического института Н.Н. Георгиевский, опубликовавший результаты своих опытов в 1903 г [17].

С. Вологдин [18] в 1908 – 1909 годах провел обширное исследование коэффициентов теплопроводности керамических и иных материалов, применяющихся в строительстве металлургических печей.

А.П. Серебровским [19], А.А. Орловым [20], Б.С. Лапшиным [21], был опубликован ряд работ трактующих о вопросах тепловой изоляции ограждающих конструкций и теплозащитных свойствах материалов [22].

Исследуя большое количество источников нельзя пройти мимо проблемы большого различия коэффициентов теплопроводности, для материалов одного и того же наименования.

Это вызвано рядом обстоятельств.

Во-первых, на коэффициент теплопроводности весьма существенное влияние оказывает структура материалов.

В-вторых, большое влияние на коэффициент теплопроводности изоляционных материалов оказывают степень пористости, влажность. А также температура.

Значительный вклад в исследовании, также обобщении фактов работы других исследователей, внес Б.Н. Кауфман, опубликовавший в своем труде «Теплопроводность строительных материалов» [22] систему общих зависимостей, характеризующих влияние структуры, степени пористости, влажности и температуры на теплопроводность строительных материалов.

Также следует отметить работу И.Каммерера, который в своих трудах установил общеизвестные зависимости иллюстрирующие влияние влажности на коэффициент теплопроводности материалов неорганического происхождения [23].

И.Каммерер[24]также рассмотрел вопрос об изменении коэффициента теплопроводности с изменением температуры в неорганических материалах ячеистого строения. Где подробно рассмотрел влияние структуры материала на величину прироста коэффициента теплопроводности при повышении температуры. Но в данных трудах Каммерер дал только качественную оценку рассматриваемого явления, количественная оценка осталась невыясненной, поскольку размер пор тех или иных материалов не фиксировался.

В вопросе о влиянии температуры существенную роль может играть состав твердой фазы материала. Известно, что с повышением температуры коэффициент теплопроводности стекол повышается, а в кристаллах же наоборот, имеет место обратное явление. (Кауфман).

В вопросе о влиянии влажности на коэффициент теплопроводности материалов неорганического происхождения, И.Каммерером были установлены зависимости [23].

В книге В.С. Григорьева[25]дается ссылка на исследование вопроса влияния толщины волокон по отношению к минеральной вате, произведенное Е.Миллером, где указывается следующее «Миллер сообщает, что образец шерсти с диаметром волокон 25μ имел коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,045$, а другой образец диаметром волокон 6μ имел $\lambda = 0,03$ ». ДалееМиллер пишет - «Если взять образцы одинаковой плотности, одинакового химического состава и т.д., и испытать их на теплопроводность, то значения коэффициентов теплопроводности будут изменяться с изменением диаметра волокон».

Профессором А.И. Жилиным [26] также отмечалось, что теплопроводность шлаковой ваты зависит от средней толщины волокон.

Все исследователи, занимающиеся изучением теплозащитных свойств легких рыхлых материалов, отмечают, что коэффициент теплопроводности таких материалов при небольших плотностях укладки имеет повышенное значение, причем сначала с увеличением объемного веса λ падает вплоть до некоторой оптимальной величины, а затем только начинает расти, подчиняясь уж обычной закономерности [22].

Это явление отмечено В.С. Григорьевым [25], Г.Л.Лагуновым[27], Е. Аллкутом[28] и рядом других авторов для минеральной ваты; Е. Гриффитсом[29] и другими для стеклянной ваты.

Это явление может быть объяснено наличием конвекции, которая, начиная с некоторой степени плотности укладки материала, оказывает преобладающее влияние на величину λ .

Что касается влияния температуры на теплопроводность И.Каммерер в своем труде [24] приводит график, иллюстрирующий значение прироста коэффициента теплопроводности при повышении температуры в неорганических материалах.

Также о явлении влияния температуры на теплопроводность в своем труде [22] описывает Б.Н. Кауфман, где дается графическое описание влияния температуры на коэффициент теплопроводности минеральной и стеклянной ваты.

Выводы:

1. Анализ объемов применения изоляционных материалов в зависимости от температуры применения показал, что около 25 % применяемой промышленной изоляции работает при температурах от +200°C до +400°C, а пять процентов изоляции работает в пределах температур от +400°C до +600°C, свыше +600°C работает всего 0,1% изоляции.

2. Анализ применения в промышленности тепловой изоляции показал, что большая часть промышленной тепловой изоляции монтируется из волокнистых материалов (минераловатные и стекловолокнистые изделия) 80-85%

2. Анализ влияния условий работы высокотемпературных агрегатов на основные характеристики теплоизоляционных материалов

2.1 Основные характеристики теплоизоляционных материалов

Основными материалами, используемыми в исследовании, стали минеральная вата, базальт и SuperSIL.

Минеральная вата представляет собой волокнистый теплоизоляционный материал, получаемый путём плавления силикатных горных пород, металлургических шлаков и их смесей [32].

Теплоизоляционные изделия из минеральной ваты включают в себя плиты (мягкие, полужесткие, повышенной жесткости, с гофрированной структурой), рулонные материалы – маты, а также войлок, скорлупы, сегменты и тд.

По виду сырья минеральную вату подразделяют на каменную и шлаковую. В первом случае для производства используются горные породы – базальт, диабаз, известняк, доломит, во втором – шлаки, являющиеся отходами производства металлов.

Процесс производства минеральной ваты включает в себя несколько этапов:

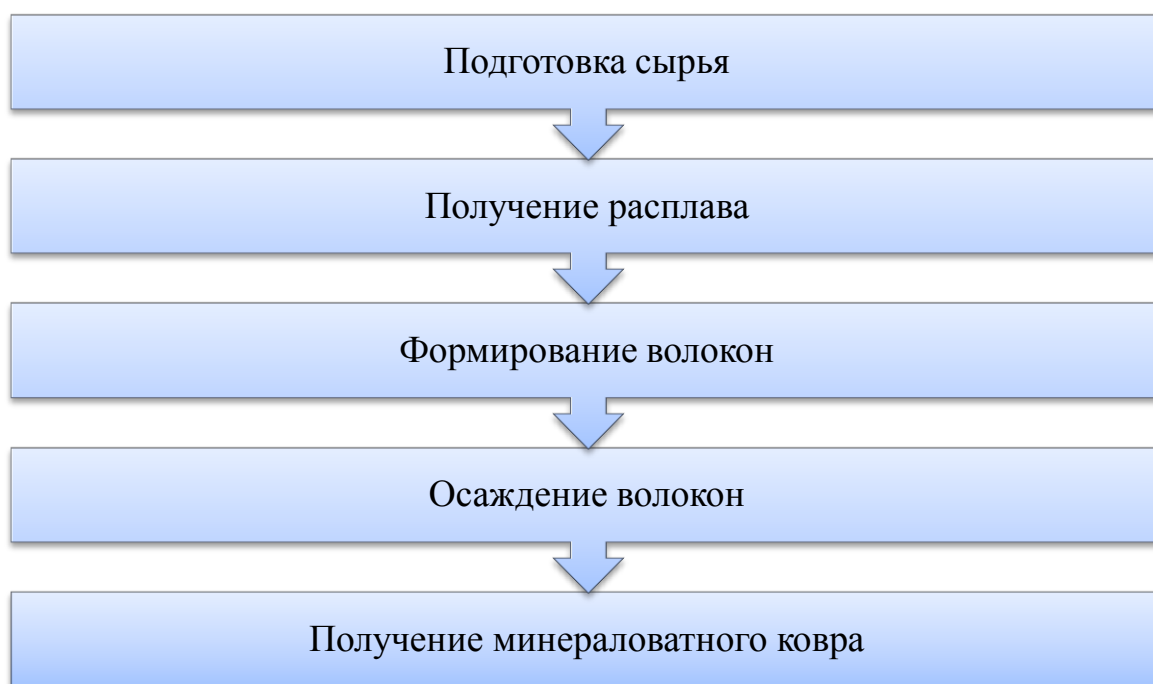


Рисунок 2.1 - Структура производства минеральной ваты

Процесс получения расплава обычно осуществляется в вагранках – шахтных плавильных печах. Сырьё загружается вместе с коксом, который является топливом. При температуре 1300-1400°C образуется расплав, который непрерывным потоком поступает из нижней части вагранки.

Формирование минерального волокна производят дутьевым или центробежным методом. Первый заключается в воздействии на струю расплава струи водяного пара или сжатого газа, второй основан на использовании

центробежной силы, превращающей горячий жидкий шлак или камень в тончайшие волокна.

Полученные нити попадают в камеру осаждения, а оттуда поступают на конвейер под уплотняющие их валки. Следующим этапом становится введение связующего, позволяющего формировать плиты или маты, а затем, после дополнительного формования и уплотнения, минераловатный ковёр подвергается продольной и поперечной резке на плиты или маты заданного размера.

Минеральная вата может иметь различную структуру волокнистости, заданную технологически: горизонтально-слоистую, вертикально-слоистую, гофрированную или пространственную, что расширяет возможности её применения в тех или иных конструкциях. Она характеризуется значительной устойчивостью к высоким температурам и действию химических веществ. Минеральная вата обладает также отличными тепло и звукоизоляционными свойствами.

Области применения минеральной ваты разнообразны — это тепловая изоляция стен и перекрытий, также минеральная вата широко используется для изоляции высокотемпературных поверхностей (печи, трубопроводы, резервуары и трубопроводы тепловых сетей, магистральные нефте- и газопроводы, технологические трубопроводы электростанций, металлургических, нефтехимических и др. промышленных предприятий и т.д.).

Вата минеральная предназначена для изготовления теплоизоляционных и звукоизоляционных изделий, а также в качестве теплоизоляционного материала в строительстве и промышленности для изоляции поверхностей с температурой до + 700 °C [33]

Существует ряд документов (ГОСТов) согласно которым регламентируются основные показатели изделий из минеральной ваты: ГОСТ 9573-2012 «Плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем теплоизоляционные» [34]; ГОСТ 21880-94 «Маты прошивные из минеральной ваты теплоизоляционные» [35]; ГОСТ 22950-95 «Плиты минераловатные повышенной жесткости на синтетическом связующем. Технические условия» [36]; ГОСТ 21880-2011 «Маты из минеральной ваты прошивные теплоизоляционные. Технические условия» [37].

Базальтовую вату получают из расплава собственно базальта, а также некоторых близких к нему горных пород базальтовой группы без каких либо дополнений в виде синтетических или минеральных веществ. Для придания большей текучести базальтовых тонких волокон в расплав добавляют от 10 до 35 % известняка или заменяющего его материала (шихты), что делает волокно ослабленным к воздействию агрессивных сред и высоких температур [38] Такое волокно уже нельзя называть базальтовым и его зачастую называют минеральным волокном или минеральной ватой. В процессе его получения волокна формируются в массе беспорядочно, образуя рыхлую высокодисперсную структуру с большим количеством воздушных прослоек.

Существует два основных типа базальтового волокна — штапельное и непрерывное. Одним из наиболее важных параметров штапельного базальтового волокна является диаметр отдельных волокон.

В зависимости от диаметра волокна делят на:

- ✓ микротонкие, диаметром менее 0,6 мкм;
- ✓ ультратонкие, 0,6 — 1,0 мкм;
- ✓ супертонкие, 1,0 — 3,0 мкм;
- ✓ тонкие, 9 — 15 мкм;
- ✓ утолщенные, 15 — 25 мкм;
- ✓ грубые — диаметром 50 — 500 мкм.

Диаметр волокон существенно влияет на важнейшие свойства изделий из него: теплопроводность, звукопоглощение, плотность и др. В зависимости от диаметра волокно используется для различных целей:

✓ *микротонкое* — для фильтров очень тонкой очистки газовой среды и жидкостей; изготовления тонкой бумаги и специальных изделий;

✓ *ультратонкое* — для изготовления сверхлегких теплоизоляционных и звукопоглощающих изделий, бумаги, фильтров тонкой очистки газовых сред;

✓ *супертонкое* для изготовления прошивных теплозвукоизоляционных матов и звукопоглощающих (БЗМ, АТМ) изделий, картона (ТК-1, ТК-4), многослойного нетканого материала, теплоизоляционного вязально-прошивного материала, длинномерных теплоизоляционных полос и жгутов (БТШ-8, БТШ-20, БТШ-30), мягких теплоизоляционных гидрофобизированных плит, фильтров и др.

Специальная термическая обработка базальтовых супертонких волокон позволяет получить микрокристаллический материал со свойствами, отличающимися от обычных волокон. Микрокристаллические волокна превосходят обычные по температуре применения на 200°C, по кислотостойкости — в 2,5 раза, а гигроскопичность их в 2 раза ниже. Основным преимуществом этого вида базальтового волокна является отсутствие усадки при его эксплуатации. Из микрокристаллического волокна изготавливают высокотемпературоустойчивые теплоизоляционные материалы, плиты, а также фильтры для фильтрации агрессивных сред при высоких температурах.

Базальтовое супертонкое волокно (БСТВ) получают двумя методами: дуплекс процесс, когда первоначально вытягиваются из расплава базальта, через фильеры первичные волокна диаметром 250—350 мкм. Которые впоследствии раздуваются высокоскоростным газовым потоком при температуре выше 1600°C в супертонкие. Второй способ это раздув сжатым воздухом струи расплава, при этом температура расплава должна быть не менее 1500°C. Вторым способом получается БТВ с более коротким волокном и менее технологичным из него невозможно производить весь ассортимент продукции.

✓ *тонкие* волокна из горных пород представляют собой слой беспорядочно расположенных волокон диаметром 9-15 мкм и длиной 3-1500 мм.

✓ *утолщенные волокна* диаметром 15-25 мкм и длиной 5-1500 мм. Получают их как методом вертикального раздува струи расплава воздухом (ВРВ), так центробежно-валковым методом известно одно производство получения грубого волокна центробежно-дутьевым способом. Вырабатывают в виде холстов, прошивных матов, плит на основе различных вяжущих. Утолщенные волокна находят широкое применение в качестве фильтровальной основы дренажных систем гидротехнических сооружений;

✓ *толстые волокна* представляют собой беспорядочно расположенные волокна длиной 5-3000 мм, диаметром 25-150 мкм, прочностью на разрыв 120—650 МПа.

✓ *грубые волокна* представляют собой относительно сыпучую дисперсно-волокнуистую массу с длиной волокон 3-15 мм, диаметром 150—500 мкм, прочностью на разрыв 200—350 МПа, удельной поверхностью 28-280 см²/г. Волокна являются коррозионно-стойкими и могут быть использованы взамен металла для армирования материалов на основе вяжущих.

Материалы на основе базальтового волокна обладают следующим важными свойствами: пористость, температуростойкость, паропроницаемость и химическая стойкость.

Пористость базальтового волокна может составлять 70 % по объёму и более. Если поры материала заполнены воздухом, то при такой пористости он характеризуется небольшой теплопроводностью. Благодаря большой паропроницаемости эти материалы при эксплуатации почти всегда сухие. Базальтовые волокна обладают хорошей стойкостью к действию органических веществ (масло, растворители и др.), а также к воздействию щелочей и кислот.

Базальтовое волокно применяется:

- теплоизоляция энергетических агрегатов, трубопроводов большого диаметра;
- изоляция кислородных колонн;
- изоляция низкотемпературного оборудования при производстве и использовании азота;
- в промышленных холодильниках и холодильных камерах, бытовых холодильниках.

Экспериментальную часть исследований продолжим на примере нового теплоизоляционного материала SuperSIL, изготавливаемого на предприятии ЗАО «РЛБ Силика» (г. Москва). Это многофункциональный, экологически чистый тепло-, звуко-, электро- и пожароизоляционный материал, изначально разработанный для авиакосмической техники. SuperSIL производится на основе полностью аморфного кремнеземного волокна. Он обладает высокими эксплуатационными характеристиками, но в отличие от многих материалов не содержит никаких связующих веществ (смолы, фенолы, формальдегид и т.п.). При нагреве данный материал не вызывает задымления, не выделяет вредных газообразных веществ и выдерживает длительно температуру до 1200°С. Это делает его эффективной заменой традиционных материалов на основе асбестовых, керамических и базальтовых волокон.

SuperSIL - экологически чистый тепло-, звуко-, электро и пожароизоляционный материал на основе полностью аморфного кремнеземного волокна – (95-98%). В отличие от всех применяемых в промышленности, строительстве и быту тепло-, звуко-, электро- и пожароизоляционных материалов все виды суперсил не содержат никаких связующих веществ, то есть не выделяют газообразных веществ при нагреве и пожарах. [39]

Таблица 2.1 - Технические характеристики материала SuperSIL

Наименование	Размерность	Значение	
Рабочая температура	град°С	1100	1200
Содержание аморфного SiO ₂	%	95	99
Линейная усадка, не более	%	7	8
Удельное электрическое сопротивление	Ом	$10^{17} - 10^{18}$	
Диаметр волокна	мкм	6-9	
Коэффициент теплопроводности	Вт/м°С		
при			
100°С		0,04	
600°С		0,16	
1000°С		0,34	

В таблице 2.2 приведена оценка показателей теплоизоляционных материалов на основе минеральных волокон.

Анализ качества материалов показывает, что базальтовые волокна (тонкие, супертонкие), лучше по показателям, представленным в таблице 2.2, чем искусственные стеклянные и подшихтованные минеральные.

Таблица 2.2 - Основные эксплуатационные, физико-химические и теплофизические характеристики теплоизоляционных материалов и изделий на основе минеральных волокон разного происхождения

Характеристики		Происхождение волокон			
		Стеклянные	Минеральные	Базальтовые тонкие (БТВ)	Базальтовые супертонкие (БСТВ)
Предельная температура применения, °С		-60.. +450	300.. 600	-190.. +700	-190 ..+1000
Средний диаметр волокна, мкм		4.. 12	4.. 12	5.. 15	1 ..3
Длина волокон, мм		15..50 (штапельные)	16	20..50 (штапельные)	50..70
Сорбционное увлажнение за 24 ч., %		1,7	0,095	0,035	0,02
Колкость, баллы		10	5	3	1
Необходимость использования связующего в изделии		+	+	+	-
Коэффициент теплопроводности, Вт/(мК)		0,038.. 0,046	0,077-0,12	0,038.. 0,046	0,035 .. 0,046
Наличие связующего, %	орг.	2,5... 10	2,5 ... 10	2,5... 10	-
	неорг.	не прим.	не прим.	12...20	-
Выделение вредных веществ		+	+	+	-
Теплоемкость, Дж/(кг*К)		1050	1050	500..800	800..1000
Упругость волокон, ГПа		до 72	54.. 80	80.. 95	100 ..110
Температура спекания, °С	без связующего	450..500	600	700.. 1000	1100..1200
	со связующим	250.. 270	270.. 300	300.. 650 с неорг.связ	1100 ..1200
Коэффициент звукопоглощения		0,8.. 0,92	0,75 .. 0,95	0,8.. 0,95	0,95 .. 0,99
Химическая устойчивость (потеря веса), %	в воде	6,2	4,5	1,6	1,6
	в щелочной среде	6	6,4	2,75	2,75
	в кислотной среде	38,9	24	2,2	2,2

2.2 Условия работы высокотемпературных агрегатов

2.2.1 Характеристика работы теплоэнергетического оборудования

В современном промышленном производстве многих видов продукции используются технологии, включающие всевозможные высокотемпературные процессы. Специальное оборудование, применяемое в этих технологиях, равно как и технический персонал, нуждается в эффективной защите.

К высокотемпературным агрегатам относятся энергетические котлы, металлургические печи и другие промышленные установки, работающие при высоких температурах.

Обмуровка энергетических котлов является наружными стенами топочной камеры и газоходов, обеспечивая одновременно газоплотность и тепловую изоляцию. Условия работы этих ограждений различны. Они зависят от конструкции котла, ограждения и его расположения в газовом тракте.

Вследствие применения радиационных поверхностей (экранов) топочные камеры практически полностью экранированы трубами с относительным шагом $s/d \leq 1,1$. Такое тесное экранирование позволило снизить температуру на внутренней поверхности обмуровки. Не экранированными поверхностями в топочной камере остаются амбразуры горелок, температура футеровки которых при входе в топку достигает 1400 - 1500 °С. Обмуровка котла – накаркасного типа, трехслойная. Она представляет собой систему ограждений, отделяющих топочную камеру и газоходы от окружающей среды. Первый слой – шамотный кирпич, второй слой – диатомитовый кирпич, третий слой – минераловатные матрасы. Снаружи обмуровки наносится уплотнительная штукатурка толщиной 5 мм.

Типовая обмуровка выполняется из огнеупорных и теплоизоляционных материалов, газоплотного покрытия, закладных металлических деталей и арматуры, соединяющих конструкцию обмуровки и поверхности нагрева котла в единое целое. Ограждая и направляя газовый поток, обмуровка подвергается непрерывному его воздействию. Наиболее опасный участок – обмуровка в области размещения пароперегревателя, в поворотной камере и в начале конвективной шахты, где условия работы ограждений более тяжелые. Из-за отсутствия экранирования этих участков внутренняя часть обмуровки подвергается воздействию высоких температур, тепловым перекосам, изменениям давления. Динамические нагрузки, резкие изменения температуры при пусках и остановках агрегата, неравномерность тепловых напряжений могут привести к разрушению обмуровки. Кроме того, движущиеся в газовом потоке несгоревшие частицы топлива, зола и расплавленные шлаки приводят к истиранию её поверхности, а химическое взаимодействие огнеупоров и шлаков вызывает размягчение, оплавление и ослабление обмуровки.

Исходя из анализа условий работы обмуровки и соответственно назначению, к ней предъявляются следующие основные требования:

- обеспечение надежной эксплуатации котельного агрегата;
- малая теплопроводность;
- герметичность, т.е. исключение присосов воздуха в топку и газоходы, а также выбросы продуктов сгорания в окружающую среду;
- механическая прочность;

- термическая стойкость, т.е. способность выдерживать значительные колебания температур в топке и газоходах котла;
- минимальная масса;
- хорошая ремонтпригодность, обеспечивающая минимальные затраты на ремонт.

Кроме того, обмуровка должна хорошо сопротивляться температурным напряжениям и воздействию золы и шлаков, а сама конструкция обмуровки должна быть простой и не требовать больших затрат и времени на её изготовление и монтаж.

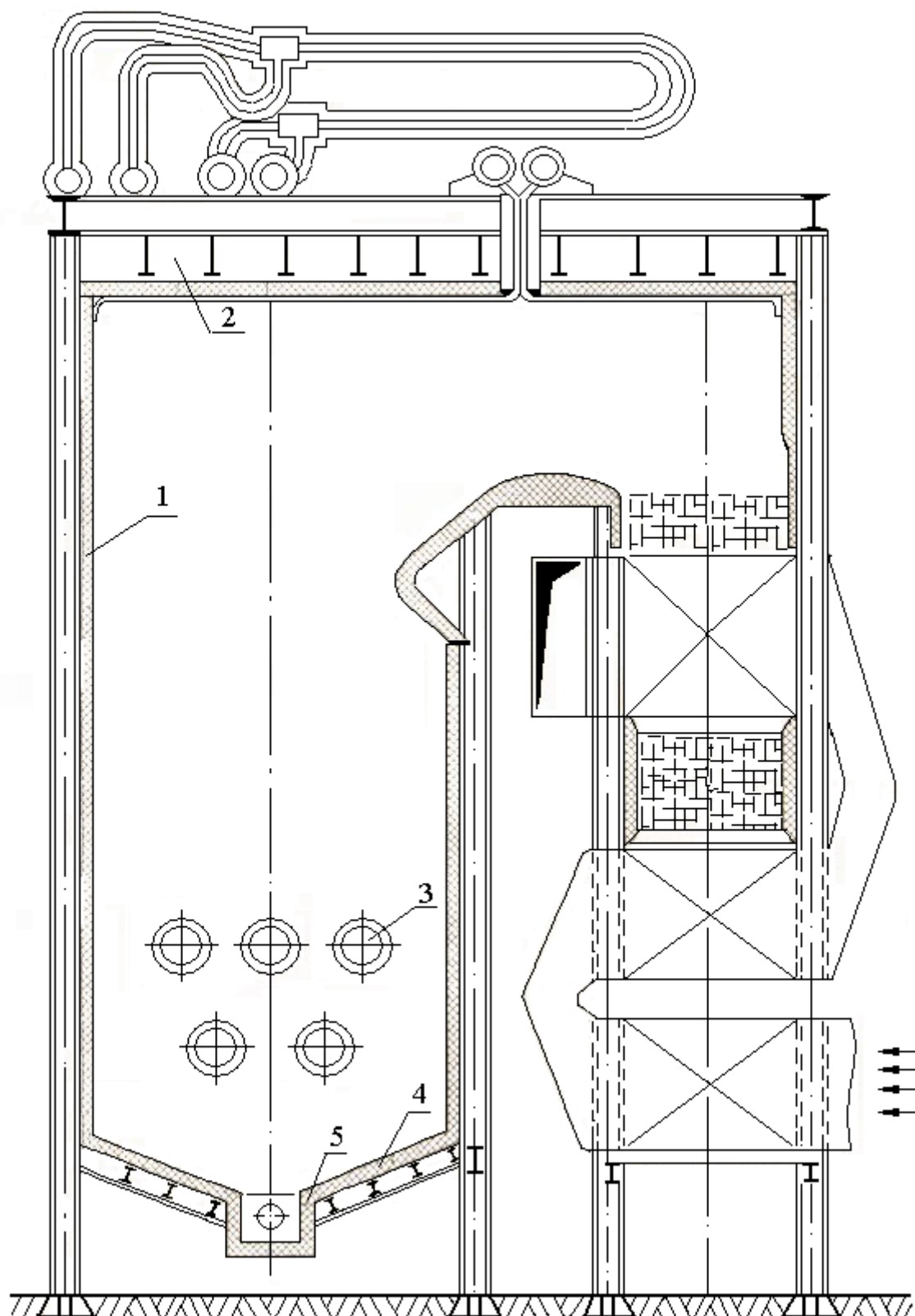
Наиболее ответственной частью обмуровки является ее огнеупорная составляющая. От её стойкости зависит ресурс работы обмуровки и, соответственно, котла в целом. Первый обращенный к топке слой обмуровки выполняется из огнеупоров – шамота, в виде кирпичей или плит. Расположенный в топке и газоходах и омываемый пламенем или горячими газами температурой от 600° до 1300 °С этот слой должен надежно противостоять длительному воздействию высоких температур, раскалённого шлака, не разрушаясь и не теряя своих свойств.

Другой составной частью обмуровки является тепловая изоляция. Условия ее работы также достаточны сложны. Она находится под действием высоких переменных температур и проникающих в нее через трещины в огнеупорном слое угольной пыли и золы.

На современных ТЭС используются теплоизоляционные материалы, ремонтпригодность которых низка. При монтаже и эксплуатации изоляции не учитываются переменные режимы работы котлов, неисследованными остаются также вопросы воздействия на теплоизоляционные материалы температурных деформаций, возникающих в огнеупорной части обмуровки. Вследствие выше перечисленных факторов тепловая изоляция теряет свои теплофизические свойства, и долговечность ее конструкции заметно снижается. Чаще всего в качестве тепловой изоляции на котлах применяются минераловатные конструкции.

В процессе эксплуатации котла данный материал находится под длительным воздействием высоких температур, волокна кристаллизуются и теряют свою прочность. Кроме этого, процесс разрушения усугубляется и другими факторами, такими как вибрация, деформация, увлажнение и т.д. При демонтаже конструкция разрушается и отсутствует возможность ее повторного применения.

Таким образом, возникает необходимость изучения влияния плотности и структуры на теплофизические свойства тепловой изоляции.



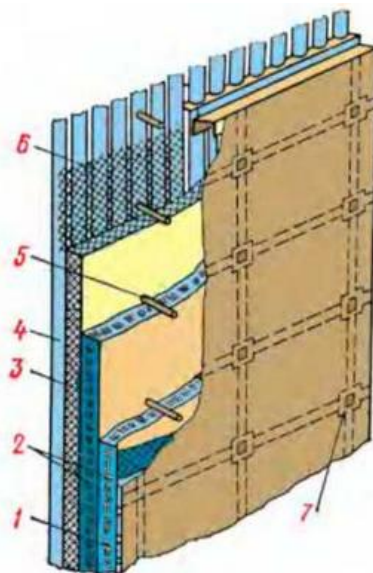
1 - стены топочной камеры и газоходов; 2 – перекрытие топочной камеры и газоходов;

3 – амбразуры; 4 – под; 5 – летка.

Рисунок 2.2 - Общий вид обмуровки парогенератора

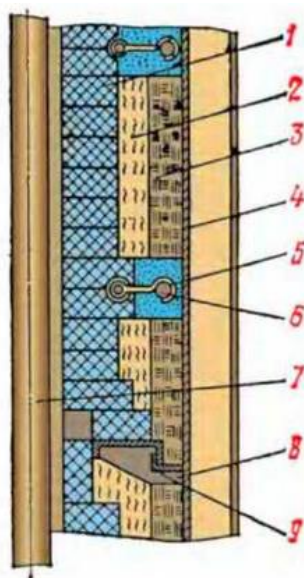
Общими элементами обмуровки независимо от вида и мощности парогенераторов являются: стены, арки, перекрытия, своды, амбразуры, поды, зажигательные пояса, летки и ряд других узлов в соответствии с рисунком 2.2 [30].

В современных парогенераторах обмуровка опирается или на металлический каркас (накаркасная обмуровка) или на трубы поверхностей нагрева (натрубная обмуровка). В качестве изоляции применяются теплоизоляционные бетоны, диатомитовый кирпич, легковесные плиты из совелита.



1 – газонепроницаемая обмазка; 2– теплоизоляционный слой; 3–шамотобетон; 4 – экранные трубы; 5 – штырь; 6 – металлическая сетка; 7 – крепежная шайба

Рисунок 2.3 – Конструкция натрубной обмуровки



1 – шамотный кирпич; 2 – диатомитовый кирпич; 3 – теплоизоляционные плиты; 4 – металлическая обшива; 5 – крюк; 6 – отрезок трубы для подвешивания крюка; 7 – экранная труба; 8 – опорный кронштейн; 9 – крюк для навески опорного кронштейна

Рисунок 2.4 – Конструкция накаркасной кирпичной обмуровки экранированных стен топки котла БКЗ-75-39ГМ

Облицовка должна обеспечивать хорошую изоляцию топки и газоходов от внешнего охлаждения, для чего наружные слои её выполняются из материалов, плохо проводящих тепло (рисунок 2.5).

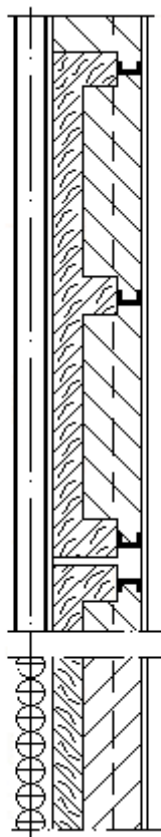


Рисунок 2.5 - Стены топочной камеры и газоходов

В процессе эксплуатации котлов в напряженном состоянии также находится обмуровка амбразур горелок, люков, гляделок, лазов, зона поверхности котла, закрытая зажигательным поясом, под топки, летки и другие участки. Слабым местом в обмуровке оказываются также стыки между плитами и панелями, угловые сопряжения стен, места прохода труб через обмуровку, крепления опор. Ослабляют ее закладные металлические детали, арматура в бетоне, из-за наличия которых и возникают трещины. Через них угольная пыль, зола и шлаки проникают в обмуровку, монолитность ее нарушается, возрастают потери теплоты в окружающую среду и увеличивается поступление холодного воздуха в топочную камеру и газоходы. Эффективность работы котла заметно снижается.

Современный парогенератор представляет собой большую и сложную систему взаимосвязанных теплообменников – поверхностей нагрева, причем свойства теплоносителей изменяются в широком диапазоне температур и давлений. В рабочем пространстве данного теплоэнергетического агрегата существует довольно сложное температурное поле газовой фазы, обмуровки (огнеупорной и тепловой защиты) и поверхностей нагрева. Особенностью задач теплообмена в котле будет являться сложность процессов переноса тепла, к которым относятся теплопроводность, конвекция и излучение, каждый из

которых определяется системами дифференциальных уравнений в частных производных. В реальных условиях работы парогенератора упомянутые процессы часто протекают в совокупности, и причем отличаются разнообразием граничных условий и широким диапазоном определяющих параметров.

Процессы теплообмена в топочной камере парогенератора тесно связаны с процессами воспламенения, горения топлива, аэродинамики газов и твердых частиц. Сложность описания процессов в топочной камере не позволила получить достаточно точную и пригодную для инженерных исследований математическую модель теплообмена в топочной камере. Поэтому для поверочных расчетов парогенераторов используются нормативный метод, в основу которого положено составление и решение для каждой поверхности нагрева и для всего агрегата в целом системы алгебраических уравнений. В эту систему входят уравнения теплового баланса, теплообмена между средами, баланса расходов теплоносителей и рабочих сред. При этом парогенератор рассматривается как взаимосвязанная система, в которой параметры на выходе из каждого теплообменника определяют граничные условия на входе в последующие.

Необходимо отметить, что передача теплоты экранам топочной камеры определяется в основном лучистым теплообменом между высокотемпературными газами, заполняющими топочный объем, и наружной поверхностью труб, покрытых слоем загрязнения.

В открытых топочных камерах с подъемным движением факела тепловосприятием топочных экранов за счет конвекции можно пренебречь, так как скорости газов около стен топки малы, а наружные загрязнения создают большое термическое сопротивление. В топках с вихревым движением факела конвективная составляющая теплообмена становится заметной и её надо учитывать.

Передача теплоты от факела к расположенным на стенах топочной камеры поверхностям нагрева представляет собой наиболее сложный случай теплообмена. Здесь процесс теплообмена идет параллельно с горением топлива, создающим в излучающей среде внутренние источники теплоты. Уровень температур газов в сечениях по высоте топки определяется соотношением интенсивности тепловыделения и теплоотвода.

В начальном периоде после воспламенения интенсивное горение топлива обеспечивает рост температуры газовой среды. Одновременно с этим нарастает поток тепловой энергии к экранам. На некотором удалении от горелок температура достигает максимума, которому соответствует равенство между тепловыделением и теплоотводом. В дальнейшем тепловыделение быстро падает и становится меньше уровня теплоотвода, в результате чего температура газов монотонно снижается. Темп снижения температуры зависит от уровня максимума температуры в ядре факела, наличия или отсутствия догорания топлива в верхней части топки, степени загрязнения экранов.

Для защиты экранных поверхностей топки в зоне активного горения топлива выполняется футеровка ошипованных экранов огнеупорными

материалами. Она необходима для поддержания высокой температуры факела, защиты поверхностей нагрева от эрозии и высокотемпературной коррозии, снижение теплонапряжения в трубах экрана. В свою очередь футеровка подвергается непрерывному динамическому воздействию раскаленных топочных газов, шлаков, летучей золы и несгоревших частей топлива.

Механизм взаимодействия топочных газов и футеровки сложен и многообразен. Газовый поток приводит к истиранию, размягчению, оплавлению и ослаблению структуры огнеупоров. Поэтому футеровка должна быть плотной, обладать хорошими эксплуатационными свойствами, низкой теплопроводностью, огнеупорностью, повышенной устойчивостью против воздействия агрессивной среды, способностью противостоять механическому разрушению. Она должна выдерживать неравномерность тепловых напряжений в топке, вследствие которых возникают сжимающие и растягивающие усилия.

В топках циклонного типа требования к футеровочному покрытию еще выше из-за увеличения скорости движения факела в пристенной области до 60 - 120 м/с и роста вследствие этого эрозии футеровки под воздействием частиц шлака и несгоревшего кокса. При интенсивном горении твердого топлива, в особенности в сочетании с вихревым движением факела, плотность теплового потока в ошипованном экране достигает $(628,5-838) \cdot 10^3$ кДж/(м²·ч) [40].

Условия работы обмуровки в районе топочной камеры несколько смягчены за счет экранирования поверхности камеры трубами. Это позволило снизить температуру на самой поверхности кладки. Однако придется учитывать то обстоятельство, что экранные трубы расположены с определенным шагом и есть участки поверхности обмуровки, которые непосредственно контактируют с агрессивными потоками раскаленных газов.

Кроме этого, как было отмечено ранее, присосы холодного воздуха в топку наносят большой ущерб процессу горения топлива. Они увеличивают потери тепла с уходящими газами, снижают паропроизводительность котла, увеличивают выбросы вредных топочных газов и ведут к перерасходу топлива на 1,2–1,4 г/(кВт·ч) [41]. В итоге коэффициент полезного действия котла снижается на 3 - 5%. Следует также заметить, что увеличение присосов резко повышает выход золошлаковых отходов из топки и загрязнение окружающей среды, почвы и водоемов.

При переменных режимах работы парогенератора в обмуровке возникают трещины, через которые холодный воздух попадает в топку. А из топки в обмуровку попадают частицы золы, что приводит к ухудшению ее теплозащитных свойств. Все это приводит к нарушению нормального процесса горения топлива. Из этого следует, что газоплотное исполнение теплоограждающих конструкций топки и газоходов котла является эффективной мерой энергосбережения.

При анализе тепловой работы обмуровки котла необходимо внимательно отнестись к термонапряженному состоянию теплоограждающих конструкций. Конструкция обмуровки котельного агрегата воспринимает нагрузки, вызываемые термическими напряжениями. Эти напряжения возникают в

результате процесса горения топлива в топке. Они могут превышать допустимые пределы и, следовательно, вызывать процесс разрушения.

Поверхности нагрева, расположенные непосредственно за пределами топочной камеры, омываются высокотемпературными газами и воспринимают значительную часть теплоты за счет лучистого теплообмена. Наибольшей долей лучистого тепловосприятия обладают полурадиационные поверхности: ширмовой пароперегреватель и фестон, расположенные на выходе из топочной камеры и воспринимающие большую долю теплоты прямого излучения из ядра факела. Обмуровка в этой зоне находится в более тяжелых с точки зрения температурных воздействий условиях. В современных парогенераторах газы покидают топку с температурой свыше 1000°C , затем пройдя ширмовый пароперегреватель, поступают в поворотную камеру к конвективному пароперегревателю с температурой $800-850^{\circ}\text{C}$, после которого их температура снижается до $500-600^{\circ}\text{C}$.

К конвективным относятся поверхности нагрева, расположенные в горизонтальном газоходе за ширмами и фестонами, и все поверхности нагрева в конвективной шахте котла. Они размещены в зоне относительно низких температур газов, где эффективность лучистого теплообмена быстро снижается. В интересах развития конвективного тепловосприятия здесь идут на повышение скорости газового потока, создание змеевиковых трубных пучков с тесным расположением труб. Теплонапряжение конвективных поверхностей по ходу газа снижается от 40 кВт/м^2 в пароперегревателях до $1-2 \text{ кВт/м}^2$, в воздухоподогревателе.

Основными требованиями к обмуровке и изоляции этих частей являются:

- сохранение потерь тепла в нормативных пределах;
- газовоздушная плотность, предохранение помещений от выброса дымовых газов и загрязнения золой;
- гарантия нормативной температуры на поверхности изоляции;
- пассивная защита металлических стен газоходов от низкотемпературной коррозии;
- воздушная плотность.

Таким образом, в котлах с естественной циркуляцией в области топочной камеры, в области размещения пароперегревателя, поворотной камере и начале конвективной шахты условия для работы ограждений более тяжелые.

2.2.2 Характеристика работы металлургических печей

К высокотемпературным агрегатам относятся также и металлургические печи.

Промышленная печь – устройство для тепловой обработки материалов.

Печи делят на пламенные и электрические. По технологическому назначению печи делят на следующие виды:

- ✓ печи для удаления влаги из материала, например, сушильные печи;

- ✓ нагревательные печи, например, нагревательные колодцы и методические печи;
- ✓ обжиговые печи, например, печи для обжига известняка;
- ✓ плавильные печи, например, мартеновские печи;
- ✓ печи для разложения (диссоциации) и возгонки материалов, например, коксовые печи.

Специфика работы теплоиспользующего оборудования (высокие температуры, агрессивные среды) предполагает использование защитных облицовок - футеровок.

Тепловая работа футеровок различного теплоиспользующего оборудования в различных агрегатах осуществляется по общим принципам и законам. С учётом того, что сталеплавильное производство является крупнейшим потребителем теплоизоляционных материалов

Футеровка – ограждение высокотемпературной зоны, состоящее из стен, свода и подины. Служит для отделения рабочей камеры от окружающего пространства и для уменьшения тепловых потерь.

Стойкость футеровок теплоиспользующих агрегатов, в основном, зависит от физико-химических свойств применяемых огнеупоров и от эксплуатационных факторов. Оптимизация факторов, влияющих на стойкость футеровки, позволяет в несколько раз увеличить рабочую кампанию агрегатов. Анализ стойкости футеровки от условий эксплуатации огнеупорных материалов нашёл своё отражение в литературе [43].

Шкляр Ф.Р. и Сургучёва Е.Л. в своей работе показывают, что при тепловом расширении огнеупорного слоя кладки происходит одновременное сжатие слоя теплоизоляции, следствием чего является уменьшение её толщины и повышение теплопроводности уплотнённого материала. В рассматриваемом примере уменьшение толщины изоляции вдвое привело к увеличению потерь тепла в окружающую среду на 15 — 20% и повышению температуры кожуха на 10-15°C [44].

Как показали исследования, наиболее резкие изменения температуры происходят в слое, близком к рабочей поверхности [45]. Причём процессы нагрева и охлаждения в различных участках по толщине футеровки могут несовпадать по времени, то есть при нагреве рабочей поверхности после её охлаждения, поверхностные слои нагреваются, а внутренние могут продолжать остывать. Несовпадающие по времени температурные изменения в различных слоях футеровки приводят к возникновению различных по знаку термических напряжений.

Говоря подробнее о тяжелых условиях работы футеровки, рассмотрим несколько примеров работы металлургических печей.

Например, в печах спекания и кальцинации по технологии производства глинозема существует несколько рабочих и температурных зон.

В печах кальцинации: первая зона - зона сушки, где удаляется влага, гидрат нагревается до 200°C, в то время как газы охлаждаются от 500°C до 300-200°C; вторая зона - зона обезвоживания, в которой гидрат превращается при 900°C в гамма-модификацию ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$), а газы соответственно охлаждаются от

1050 до 600°C; третья зона - зона прокаливания, где температура среды составляет 1250°C, а гамма-модификация частично переходит в альфа-модификацию (α -Al₂O₃). Объем исходного продукта уменьшается примерно на 13%, а твердость повышается, что усиливает абразивное воздействие глинозема на футеровку; четвертая зона - зона охлаждения, в которой материал охлаждается до 1100°C и затем сыпается в холодильник. В печах спекания перерабатывается шихта из смеси красного шлама, известняка и соды. Здесь первая зона - зона сушки и подогрева сырья с температурой порядка 500°C; вторая зона - зона кальцинирования, где температура среды достигает 900°C; третья зона - зона спекания, где температура возрастает до своего максимального значения 1100-1250°C; в четвертой зоне полученный спек начинает охлаждаться. Отходящие из печи газы имеют температуру порядка 250-350°C [46].

Таким образом, как следует из приведенных данных, огнеупорные материалы футеровки печей эксплуатируются в тяжелых температурных условиях. Стойкость кладки в таких мощных печах составляет лишь 150-200 суток и в среднем 7% календарного времени эти печи простаивают из-за ремонта футеровки [47]. Вспучивание футеровки ведет и к деформации изоляционного слоя.

В случае разрушения огнеупорного слоя футеровки происходит химическое взаимодействие между обрабатываемым материалом и изоляцией. Кроме того, в результате вращения печи футеровка также испытывает знакопеременные механические напряжения.

В конвертерах наиболее активно процесс протекает в фурменной зоне продуваемой окислителем. Футеровка противостоит высоким температурам порядка 1200-1300°C [48]. В фурменной зоне футеровка должна иметь высокую механическую прочность и противостоять воздействию окислителя. Значительные колебания температур приводят к возникновению предельных температурных напряжений. Также футеровочный слой подвергается механическим воздействиям расплава и ударам крупнокусковых материалов.

Футеровка индукционных печей проводится для защиты кожуха от воздействия высоких температур, а также для сокращения тепловых потерь. В индукционной печи футеровка состоит из плавильного тигля, сливного носка (воротника), подины, крышки и самого ответственного слоя – тепловой изоляции. Поскольку тигель является самой ответственной частью печи, во многом определяющим её эксплуатационную надежность, то его следует надёжно защитить [49].

Огнеупорные изделия применяют для строительства рабочего пространства и других элементов печей, работающих в условиях высоких температур и воздействия агрессивных сред – расплавов, окалины, газов. Чтобы уменьшить потери теплоты, футеровку печи по толщине делают, как правило, комбинированной: рабочий слой выполняют из огнеупорных, наружный слой – из теплоизоляционных изделий.

Теплоизоляционные материалы для футеровок делят по ряду признаков на следующие группы:

- ✓ по огнеупорности – на огнеупорные, выдерживающие рабочую температуру 800 °С, и неогнеупорные, которые могут быть использованы только при температурах ниже 800 °С;
- ✓ по происхождению – на естественные и искусственные;
- ✓ по форме и способу применения – теплоизоляционные материалы выполняются в виде изделий (кирпичей, листов и т.д.) или в виде неформованных материалов (засыпки, ваты, волокон и др.) [50].

К огнеупорным естественным теплоизоляционным материалам относятся: диатомит, инфузорная земля, трепел и вермикулит.

К искусственным теплоизоляционным материалам относятся пористые легковесные огнеупоры и изделия из различных волокон. Легковесные изделия могут изготавливаться из шамота, динаса, диатомита, высокоглиноземистого сырья и т.п.

Для тепловой изоляции металлургических печей применяются три вида изделий:

- ✓ легковесные пористые огнеупорные кирпичи: шамот-легковес, динас-легковес, диатомитовый и другие;
- ✓ теплоизоляционные засыпки;
- ✓ изделия в виде плит, ваты, войлока, картона, изготовленные на основе керамического волокна в смеси со связующим материалом, так называемые волокнистые огнеупоры.

Волокнистые огнеупоры являются относительно новыми теплоизоляционными материалами.

По сравнению с обычными огнеупорами шамот-легковес и другие легковесы имеют более низкую прочность, шлакоустойчивость и термостойкость. Их можно применять не только для теплоизоляционного слоя футеровки, но и для рабочего слоя, в термических печах. Диатомитовый кирпич применяют только для наружного слоя тепловой изоляции стен и свода нагревательных печей.

В таблице 2.3 представлены некоторые виды волокнистых огнеупорных изделий и их свойства. Волокнистые плиты, как и шамот-легковес, применяют для изготовления не только изоляционного, но и рабочего слоя футеровки термических печей с целью снижения потерь теплоты в рабочем пространстве печи. При этом уменьшаются два вида потерь: на аккумуляцию теплоты футеровкой и теплопроводностью через футеровку в окружающую среду.

Таблица 2.3 – Свойства легковесных огнеупорных изделий

№	Тип и марка изделия	Плотность – ρ , т/м ³	$T_{\text{раб}}^{\text{max}}$, °C	Коэф. теплопроводности – λ , Вт/(м·К)	Уд. теплоемкость – c , кДж/(кг·К) в интервале 0-1400 °C
1	Динас ДЛ-1,2	1,2	1500	$0,58+0,38 \cdot 10^{-3} \cdot t$	1,19
2	Шамот ШЛ-1,3	1,3	1350	$0,47+0,14 \cdot 10^{-3} \cdot t$	1,19
3	ШЛ-0,9	0,9	1200	$0,29+0,20 \cdot 10^{-3} \cdot t$	1,17
4	ШЛ-0,4	0,4	1100	$0,06+0,14 \cdot 10^{-3} \cdot t$	1,17
5	Диатомитовый кирпич	0,5	1000	0,15 (при $t=350$ °C)	1,0

Таблица 2.4 – Виды волокнистых огнеупорных изделий Северского огнеупорного завода (Донецкая область)

№ пп	Тип и марка изделия	Толщина, мм	Плотность – ρ , т/м ³	$T_{\text{раб}}^{\text{max}}$, °C	Коэф. теплопроводности – λ , Вт/(м·К) при 600 °C	Уд.теплоемкость – c , кДж/(кг·К)
1	Плита ШПГТ-450	100	0,45	1300	0,2	1,0
2	Вата МКРР-130	15; 20	0,13	1250	0,22	1,0
3	Войлок МКРВЦ-150	15; 20	0,15	1400	0,14	1,0
4	Фетр МКРВЦФ-130	15; 20	0,13	1400	0,18	1,0

Изделия из волокнистых материалов позволяют создать новые, легкие конструкции футеровок стен и сводов, являясь при этом и огнеупором и теплоизоляцией. Низкая теплопроводность позволяет уменьшать габариты печи за счет толщины футеровки, что в сочетании с низкой плотностью делает возможным в несколько (до 10) раз снизить массу футеровки печи. Аккумулируемая во время разогрева теплота, таким образом, уменьшается также в несколько раз. Резко сокращается время разогрева печи, позволяя экономить не только энергоресурсы, но и уменьшая непроизводительное время работы печи и обслуживающего персонала. Поэтому волокнистые материалы называют ещё малоинерционными. Особенно эффективно их применение в термических печах периодического действия, с постоянными колебаниями температуры печного пространства и в печах, работающих не в полную загрузку, в так называемом «рваном режиме».

Применение волокнистых материалов нового поколения нанеорганических связующих обеспечивает значительное снижение трудоемкости футеровочных работ и высокую ремонтпригодность футеровки при ее механическом повреждении. Эти материалы легко обрабатываются и не критичны к циклам нагрев - охлаждение. Количество термосмен составляет 1000 - 2000 без видимых изменений качества материала.

Футеровка из волокнистых материалов часто выполняется многослойной. Например, внутренний слой представляет собой плиту из муллитокремнезёмистого волокна на высокотемпературном неорганическом связующем, второй слой, один из самых дешевых материалов, перлитобентонитовый кирпич, а третий слой выполнен в виде плиты из базальтового волокна. Многослойность футеровки обусловлена тем, что в ней используются лучшие качества всех материалов. Первый рассчитан на более высокую температуру эксплуатации, у следующих слоев ниже теплопроводность в данном интервале температур и, кроме того, они дешевле. Таким образом, при применении многослойных футеровок из волокнистых материалов можно добиться оптимального соотношения цены и качества.

2.3 Влияние высоких температур на теплофизические свойства теплоизоляционных материалов

2.3.1 Общие понятия

Изоляция высокотемпературных установок работает в тяжелых условиях, прежде всего из-за непрерывного действия высоких температур и деформаций. Основное свойство, которым должен обладать теплоизоляционный материал, - это низкая способность проводить теплоту, характеризуемая соответственно малым значением теплопроводности λ .

Теплопроводность теплоизоляционного материала определяет требуемую толщину теплоизоляционного слоя, а следовательно, и нагрузки на изолируемый объект, конструктивные и монтажные характеристики теплоизоляционной конструкции.

Для того чтобы понять, от чего зависит этот показатель необходимо подробнее остановиться на процессе теплообмена в газонаполненных системах, каковыми являются теплоизоляционные материалы.

Теплообмен в волокнистом теплоизоляционном слое является сложным процессом, включающим перенос теплоты теплопроводностью, излучением, конвекцией [3,50] и осуществляется посредством:

- ✓ кондуктивной теплопроводности волокна, образующего пористую структуру теплоизоляционного слоя и заполняющего межволоконное пространство газа;
- ✓ радиационного теплообмена в поглощающей, отражающей и рассеивающей среде межволоконного пространства;

✓ конвективных токов газа, заполняющего межволоконное пространство, возникающих вследствие разности температур граничных поверхностей теплоизоляции.

Для упрощения тепловых расчетов используется зависимость, основанная на законе Фурье, справедливом, лишь для гомогенных тел, в которых перенос тепла при наличии градиента температур происходит только за счет кондуктивной теплопроводности. Из этого следует, что коэффициент теплопроводности является суммарной характеристикой проводимости теплоты.

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_q + \lambda_p + \lambda_k,$$

где $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективная теплопроводность;

λ_q – коэффициент кондуктивной теплопроводности;

λ_p – коэффициент радиационной теплопроводности;

λ_k – коэффициент конвективной теплопроводности.

Таким образом, эффективная теплопроводность является сложной функцией, зависящая от многих факторов: температуры, давления газа в порах, размера пор, степени черноты стенок капилляров и ячеек и др., оказывающих различное влияние на величину коэффициента теплопроводности [51]

Для нахождения отдельных составляющих эффективной теплопроводности волокнистых материалов используются современные представления о механизме взаимосвязанных процессов тепло- и массообмена.

К традиционным методам исследования теплофизических свойств теплоизоляционных материалов относятся основанные на стационарном тепловом режиме и на нестационарном тепловом режиме. Стационарные методы применяются для определения коэффициента теплопроводности по величине установившегося теплового потока через образец

Рассмотрим влияние отдельных факторов на коэффициент теплопроводности.

2.3.2 Влияние объемной массы и размера пор на теплопроводность тепловой изоляции

Так как доля газа в теплоизоляционных материалах составляет от 80 до 99 %, то преобладающее влияние на коэффициент их теплопроводности оказывает газ. Обычно поры теплоизоляционного материала заполнены воздухом. При замене воздуха другими газами с более низкой теплопроводностью теплопроводность изоляции можно снизить до 30 % [51]. Однако при использовании таких материалов в условиях высоких температур процесс замещения газов на воздух происходит медленнее, чем при пониженных температурах, так как определяется молярным переносом, а не диффузионным.

Зная объемную массу изоляции ρ_u и плотность материала, образующего твердый скелет $\rho_{m\phi}$, можно определить пористость теплоизоляции m

$$m = \frac{(\rho_u - \rho_{m\phi})}{\rho_{m\phi}}$$

Эта величина колеблется в пределах 0,7...0,95 [3]. Расчетные формулы для определения кондуктивной теплопроводности теплоизоляции в сухом состоянии были предложены О. Кришером [51]. Полуэмпирическая модель дает вполне удовлетворительные результаты при расчете теплопроводности теплоизоляционных материалов, нашедших широкое применение в конструкциях промышленной изоляции.

Расчетные формулы этой модели для определения кондуктивной теплопроводности в сухом состоянии имеют вид:

$$\lambda_q = \frac{1}{\frac{(1-\alpha)}{\lambda_1} + \frac{\alpha}{\lambda_2}};$$

$$\lambda_1 = (1 - m)\lambda_\phi + \frac{\alpha}{\lambda_2};$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{\frac{1-m}{\lambda_\phi} + \frac{m}{\lambda_2}};$$

где α - экспериментально определяемый коэффициент, характеризующий структуру материала; m - пористость материала в долях единицы; λ_ϕ - теплопроводность волокна; λ_2 - теплопроводность газа, заполняющего пористую структуру материала.

Эти зависимости справедливы как для волокнистых, так и для ячеистых материалов. Из них следует, что чем выше пористость (или чем ниже плотность теплоизоляции), тем ниже кондуктивная составляющая эффективной теплопроводности.

Однако стремление изготовить теплоизоляционный материал, обладающий наименьшей объемной массой, неизбежно приводит к увеличению размера пор. Но в крупных порах (при всех прочих равных условиях) разность температур стенок больше, что влечет за собой увеличение лучистого (радиационного) теплообмена, пропорционального разности четвертых степеней абсолютных температур.

Уменьшение размера пор волокнистой изоляции ведет к снижению конвективной составляющей теплопотерь.

Если же говорить о ячеистых материалах, то конвективного переноса тепла не наблюдается вообще, поскольку эти материалы практически не имеют сквозных пор в отличие от волокнистой изоляции, где сквозная пористость является преобладающей. На долю же радиационной составляющей теплопроводности приходится всего 7–10 % [51].

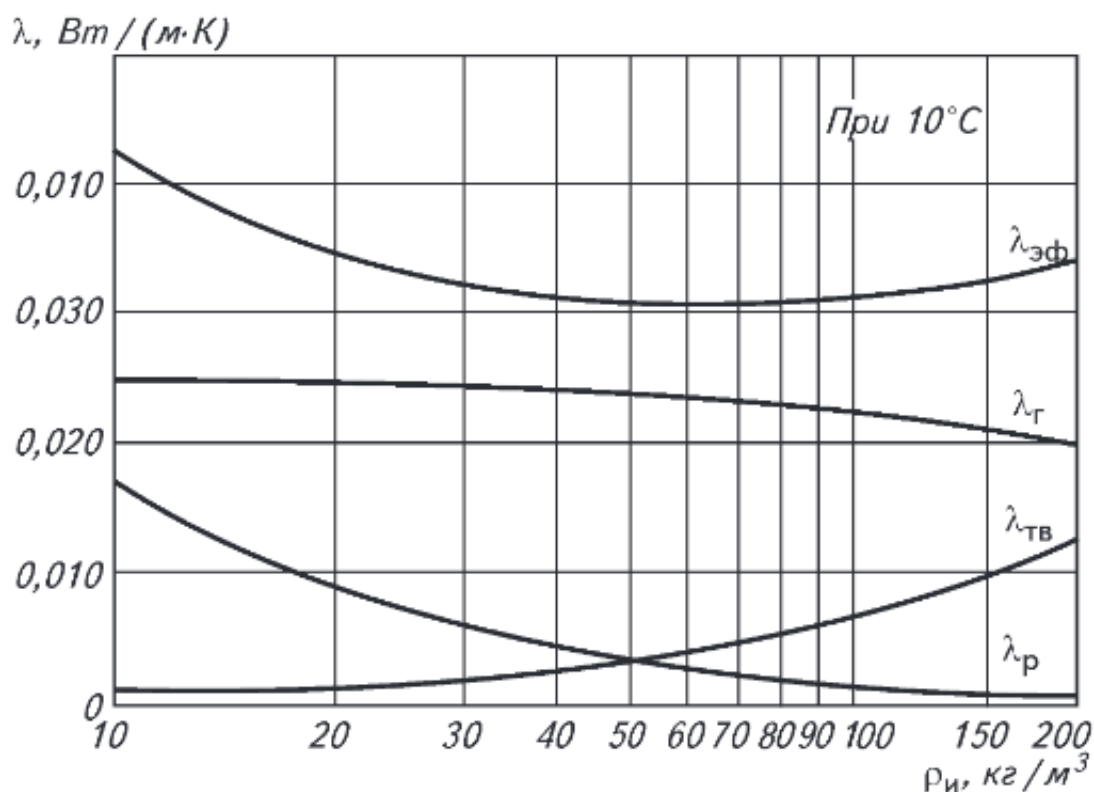


Рисунок 2.6 – Зависимость коэффициента теплопроводности ячеистого материала от его объемной массы

На рисунке 2.6 представлена зависимость коэффициента теплопроводности ячеистого материала от его объемной массы [51], имеющая минимум, находящийся в пределах плотности $40\text{--}90 \text{ kg}/\text{m}^3$.

В том числе на кондуктивную теплопроводность газа наполнителя могут оказывать влияние межмолекулярные взаимодействия на границе газ-волокно. При пористости больше 0,8 даже при диаметре волокон 0,5 микрон теплопроводность газа наполнителя в порах материала не отличается от теплопроводности газа в свободном объеме.

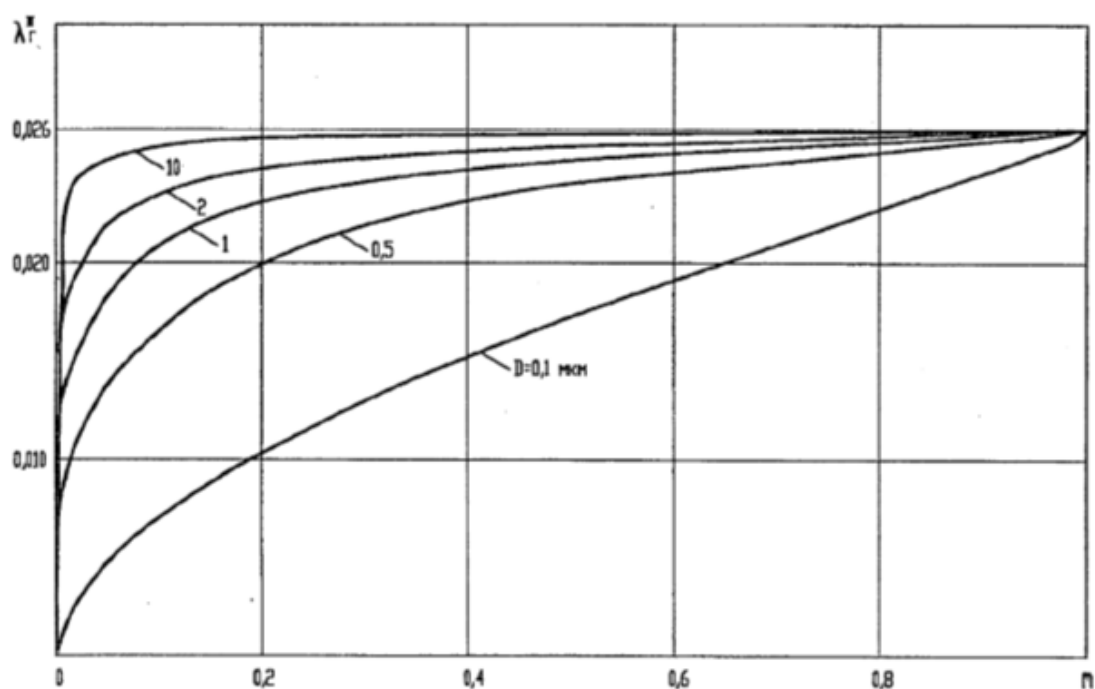


Рисунок 2.7 - Зависимость теплопроводности газа внутри дисперсного волокнистого материала от пористости

На коэффициент теплопроводности также может оказывать влияние и толщина волокон. В целях выяснения влияния толщины волокон и других факторов «Термопроект» произвел испытания минеральной и стеклянной ваты различных видов. Результаты, которых приведены ниже:

Таблица 2.5 - Теплопроводность минеральной и стеклянной ваты по испытаниям Термопроекта

Наименование материалов	Объемный вес в сухом состоянии в т/м ³	Средний коэффициент теплопроводности в сухом состоянии при 30±5° λ в ккал/м час град	Средний прирост коэффициента теплопроводности на 100° повышения температуры δ ₁ в ккал/м час град
Минеральная вата			
Вата Московского завода «жесткая» d-12,4 μ p=10,2 %	0,070	0,049	-
	0,100	0,045	-
	0,140	0,051	0,0090
	0,175	0,053	0,0085
	0,250	0,057	0,0080
	0,325	0,062	0,0075

Продолжение таблицы 2.5

Вата Краматорского завода «товарная» d-3,0 μ p=10,1 %	0,070	0,045	-
	0,100	0,042	-
	0,140	0,046	0,0093
	0,175	0,047	0,0092
	0,250	0,054	0,0092
	0,325	0,056	0,0090
Вата Московского завода «жесткая» d-12,4 μ p=10,2 %	0,070	0,049	-
	0,100	0,045	-
	0,140	0,051	0,0090
	0,175	0,053	0,0085
	0,250	0,057	0,0080
	0,325	0,062	0,0075
Вата Краматорского завода «товарная» d-3,0 μ p=10,1 %	0,070	0,045	-
	0,100	0,042	-
	0,140	0,046	0,093
	0,175	0,047	0,092
	0,250	0,054	0,092
	0,325	0,056	0,090
Вата Московского завода «товарная» d-3,7 μ p=10,7 %	0,070	0,045	-
	0,100	0,043	-
	0,140	0,046	-
	0,175	0,049	0,0100
	0,250	0,054	0,0093
	0,325	0,057	0,0085
Вата Московского завода «товарная» d-3,7 μ p=20,5 %	0,070	0,048	-
	0,100	0,043	
	0,140	0,050	
	0,175	0,052	0,0088
	0,250	0,055	0,0091
	0,325	0,058	0,0089
Вата Московского завода «товарная» d-3,7 μ p=30,1 %	0,070	0,048	
	0,100	0,043	
	0,140	0,050	0,0100
	0,175	0,052	0,0100
	0,250	0,056	0,0095
	0,325	0,059	0,0090
Вата Московского завода «пушок» d-3,1 μ p=0,0 %	0,070	0,040	
	0,100	0,039	
	0,140	0,041	
	0,175	0,046	
	0,250	0,053	
	0,325	0,056	

Окончание таблицы 2.5

Смесь ваты Московского завода: 50% «жесткой» + 50% «товарной»	0,070	0,046	
	0,100	0,041	
	0,140	0,048	
	0,175	0,051	
	0,250	0,056	
	0,325	0,059	
Стеклопленочная вата			
Вата завода «Дружная горка» d-15μ	0,070	0,040	
	0,100	0,039	
	0,140	0,042	0,0115
	0,175	0,048	0,0102
	0,250	0,053	0,0092
	0,325	0,057	0,0088
Вата экспериментальный образец d-13,5μ	0,070	0,038	
	0,100	0,037	
	0,140	0,041	0,0109
	0,175	0,045	0,0098
	0,250	0,052	0,0088
	0,325	0,055	0,0084
Вата импортная d-9,5μ	0,070	0,038	
	0,100	0,037	
	0,140	0,043	0,0092
	0,175	0,045	0,0094
	0,250	0,051	0,0081
	0,325	0,055	0,0078
Вата экспериментальный образец d-13,5μ	0,070	0,038	
	0,100	0,037	
	0,140	0,043	0,0079
	0,175	0,045	0,0076
	0,250	0,050	0,0072
	0,325	0,054	0,0069

2.3.3 Влияние толщины волокон на коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов

Толщина волокон испытанной стекловатной ваты изменялась в пределах от 15 до 5.

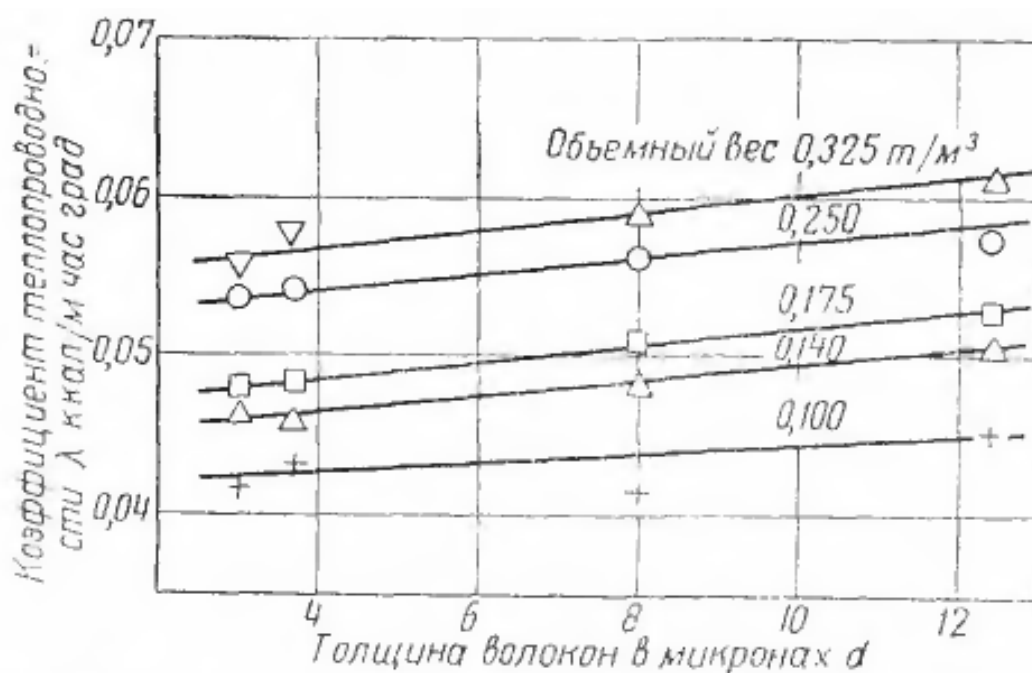


Рисунок 2.8 - Влияние толщины волокон на теплопроводность минеральной ваты



Рисунок 2.9 - Влияние толщины волокон на теплопроводность стеклянной ваты

Из рисунков 2.8, 2.9 видно, что с повышением толщины волокон коэффициент теплопроводности возрастает. Однако это возрастание сравнительно не велико. Это объясняется тем, что минеральная вата и стеклянная вата имеют специфическую структуру. Размер волокон, которых не в полной мере определяет собой размер воздушных прослоек, так как границы последних не очерчиваются с такой резкостью, как в ячеистых материалах.

2.3.4 Влияние температуры на коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала

Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов возрастает с повышением температуры, поскольку увеличивается теплопроводность, как твердых составных частей материалов, так и воздуха, заполняющего поры.

Минеральная вата подверглась с рассматриваемой точки зрения довольно значительным исследованиям.

И.Каммерер приводит график, иллюстрирующий значение прироста коэффициента теплопроводности при повышении температуры в неорганических материалах волокнистого строения. Если эти данные пересчитать в абсолютных единицах то получится, что вне зависимости от величины коэффициента теплопроводности материала величина δ_1 будет постоянной и равной $\delta_1 = 0,0135 \text{ ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}$, т.е. налицо то же явление, которое по данным того же Каммерера наблюдается и в материалах ячеистого строения.

На рисунке 2.10 Показаны результаты определения коэффициентов теплопроводности, в зависимости от температуры, для различных видов минеральной ваты – с различным содержанием включений, при постоянной толщине волокон и с разной толщиной волокон, при постоянном содержании включений.

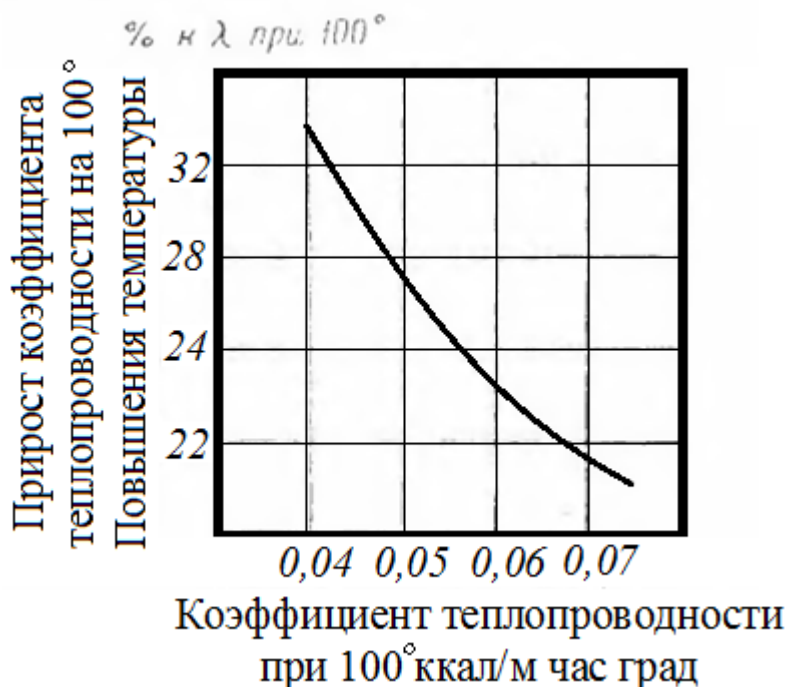


Рисунок 2.10 - Влияние температуры на теплопроводность неорганических волокнистых материалов по Каммереру

На рисунке 2.11 показаны результаты определения коэффициентов теплопроводности, в зависимости от температуры, для различных видов

минеральной ваты – с различным содержанием включений, при постоянной толщине волокон и с разной толщиной волокон, при постоянном содержании включений.

В ячеистых материалах с увеличением объемного веса уменьшается количество ячеек, при сохранении постоянным их размера. При этом в них происходит только увеличение содержания твердой фазы, у которой величина δ_1 выше, чем у воздуха в порах. Аналогичного порядка явление имеет место и в зернистых материалах, причем там с увеличением объемного веса размер междузерновых пустот также остается постоянным.

В таких материалах как минеральная вата, повышение объемного веса, помимо увеличения содержания твердой фазы, вызывает уменьшение размера пустот между волокнами, с соответствующим уменьшением величин δ_1 в воздушной фазе. Оба эти явления в какой-то мере взаимно компенсируют друг друга. Помимо того, следует иметь ввиду, что прирост коэффициента теплопроводности при повышении температуры в пустотах минеральной ваты связан не только с влиянием излучения, но и по видимому с конвективными токами. Уплотнение материала резко снижает влияние конвекции и в рассматриваемом диапазоне объемных весов, как показывают данные может перекрыть влияние увеличения содержания плотной фазы с ее высокой величиной δ_1 .

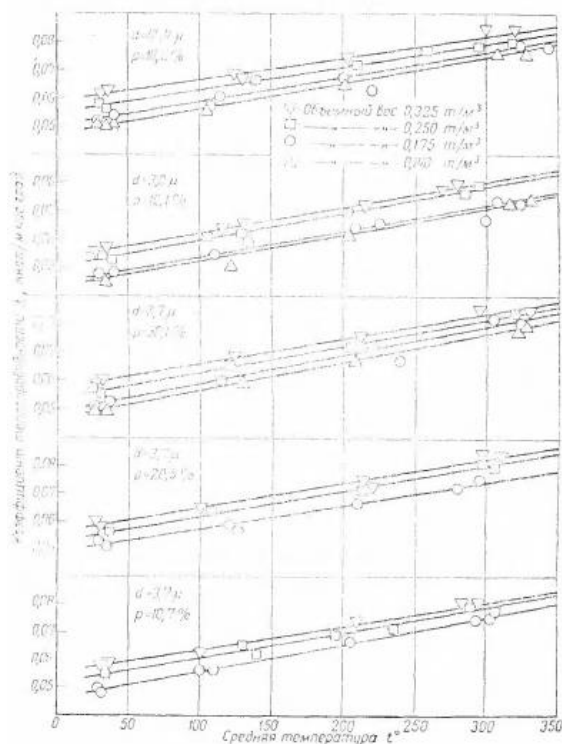


Рисунок 2.11 - Влияние температуры на теплопроводность минеральной ваты

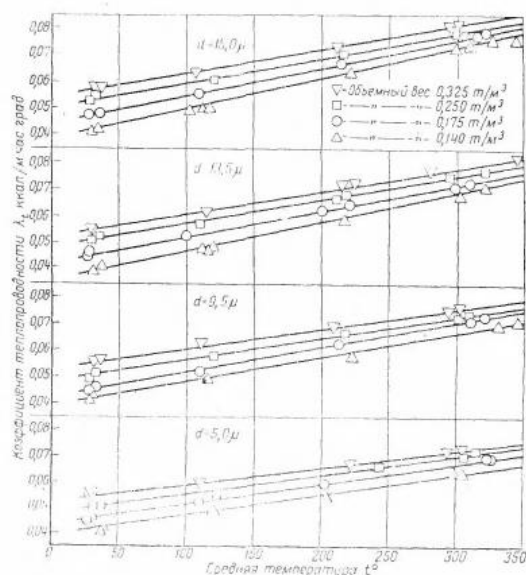


Рисунок 2.12 - Влияние температуры на теплопроводность стеклянной ваты

Исходя из данных, приведенных в таблице 2.5 целесообразно принять для минеральной ваты, следующие усредненные значения величин прироста коэффициента теплопроводности на 100°C повышения температуры:

Таблица 2.6 – Усредненные значения величин прироста коэффициента теплопроводности на 100°C повышения

Для ваты	0,15 – 0,20 т/м ³	$\delta_t = 0,0095$ ккал/м час град
объемным	0,25 – 0,30 т/м ³	$\delta_t = 0,0090$ ккал/м час град
весом	0,35 т/м ³	$\delta_t = 0,0085$ ккал/м час град

Выводы:

1. Изученный материал об условиях работы теплотехнического оборудования дает право утверждать, что в котлах с естественной циркуляцией в области топочной камеры, в области размещения пароперегревателя, поворотной камере и начале конвективной шахты условия для работы ограждений более тяжелые.

2. На основе приведенных данных можно сделать вывод, что огнеупорные материалы футеровки печей эксплуатируются в тяжелых температурных условиях. Стойкость кладки в печах составляет лишь 150-200 суток и в среднем 7%

3. Изученный материал дает основание сделать вывод, что процессы нагрева и охлаждения в различных участках по толщине футеровки могут не совпадать по времени. Несовпадающие по времени температурные изменения в различных слоях футеровки приводят к возникновению различных по знаку термических напряжений, которые ведут к ее разрушению и деформации, а следовательно, и тепловой изоляции входящей в футеровку

3 Экспериментально-исследовательская часть

3.1 Экспериментальные исследования влияния температуры процесса на плотность теплоизоляционного материала

Экономия топливно-энергетических ресурсов имеет значительно более высокую рентабельность по сравнению с наращиванием добычи топлива и строительством новых мощностей по производству энергии.

Большое значение в этой энергетической программе имеет высокоэффективная тепловая изоляция.

От правильного выбора тепловой изоляции во многом зависит возможность проведения технологических процессов в заданных параметрах с наименьшими энергетическими затратами, создание безопасных и комфортных условий работы обслуживающего персонала на производстве. Тепловая изоляция обеспечивает транспорт тепла от источника до потребителя с наименьшими потерями, предотвращает замерзание холодной воды в трубопроводах в зимнее время года, позволяет хранить сжиженные и природные газы в изотермических хранилищах, обеспечивает снижение энергозатрат на отопление зданий и сооружений.

Однако в процессе эксплуатации теплоизоляционные конструкции подвергаются температурным, влажностным, механическим, и другим воздействиям.

Основными показателями, характеризующими эффективность теплоизоляционных материалов и пригодность их применения для различных условий, являются: плотность, теплопроводность, температуростойкость, сжимаемость и упругость (для мягких материалов), прочность на сжатие при 10 % деформации (для жестких и полужестких материалов), вибростойкость, горючесть, водостойкость и стойкость к воздействию химически агрессивных сред, содержание органических веществ.

Средняя плотность - величина, равная отношению массы вещества ко всему занимаемому им объему. Средняя плотность измеряется в кг/куб.м. Плотность применяемых в настоящее время в промышленности теплоизоляционных материалов лежит в пределах от 17 до 400 кг/куб.м, в зависимости от их назначения.

Известно, что чем меньше средняя плотность сухого материала, тем лучше его теплоизоляционные свойства при температурных условиях, в которых находятся ограждающие конструкции. Чем меньше средняя плотность материала, тем больше его пористость. От характера пористости зависят основные свойства материалов, определяющие их пригодность для применения в строительных конструкциях: теплопроводность, сорбционная влажность, водопоглощение, прочность. Наилучшими теплоизоляционными свойствами обладают материалы с равномерно распределенными мелкими замкнутыми порами.

Теплопроводность теплоизоляционных материалов изменяется в зависимости от температуры и плотности, поэтому при выборе материала для конкретной конструкции необходимо учитывать оба этих фактора.

Обычно теплоизоляционные материалы с низкой плотностью имеют низкую теплопроводность в диапазоне средних температур 100-150 °С, при повышении температуры теплопроводность материалов резко увеличивается. В то же время материалы с высокой плотностью имеют более высокую теплопроводность при низких температурах, в тоже время при более высокой температуре теплопроводность этих материалов ниже, чем у материалов с низкой плотностью при той же температуре.

Это свойство во многом определяет необходимость уплотнения волокнистых теплоизоляционных материалов на монтаже до плотности, при которой теплоизоляционный материал имеет оптимальную теплопроводность.

Исследования, проведенные в разные годы в институте «Теплопроект» показали, что для минераловатных теплоизоляционных материалов оптимальная плотность в конструкциях должна составлять 120-150 кг/м³, стекловолоконных изделий из супертонкого базальтового и стеклянного волокна – 60-80 кг/м³.

Немаловажное значение для теплоизоляционных материалов имеет допустимая температура применения теплоизоляционных изделий.

В связи с этим был проведен ряд экспериментов по определению влияния температуры материала на его плотность. С этой целью были изучены следующие теплоизоляционные материалы:

1. Минеральная вата
2. Базальтовая изоляция
3. Полиуретан
4. Материал SuperSil

3.1.1 Этапы проведения работы

Исследования проводились в лаборатории «Метрологии» на базе кафедры «Энергосберегающие технологии» Инновационного Евразийского Университета.

Объектом исследования являются образцы минеральной ваты, базальтовой изоляции, SuperSil и полиуретана (Рисунок 2.1). Первым этапом эксперимента была подготовка, замер образцов, расчет плотности при температуре окружающей среды +20 °С.

Замер линейных размеров (длины, ширины, высоты) образцов изоляции производился штангенциркулем (150 мм) Штангенциркуль – это инструмент, предназначенный для измерения наружных и внутренних линейных размеров (Рисунки 3.2, 3.3).

Выбор объекта
исследования

Тепловая изоляция

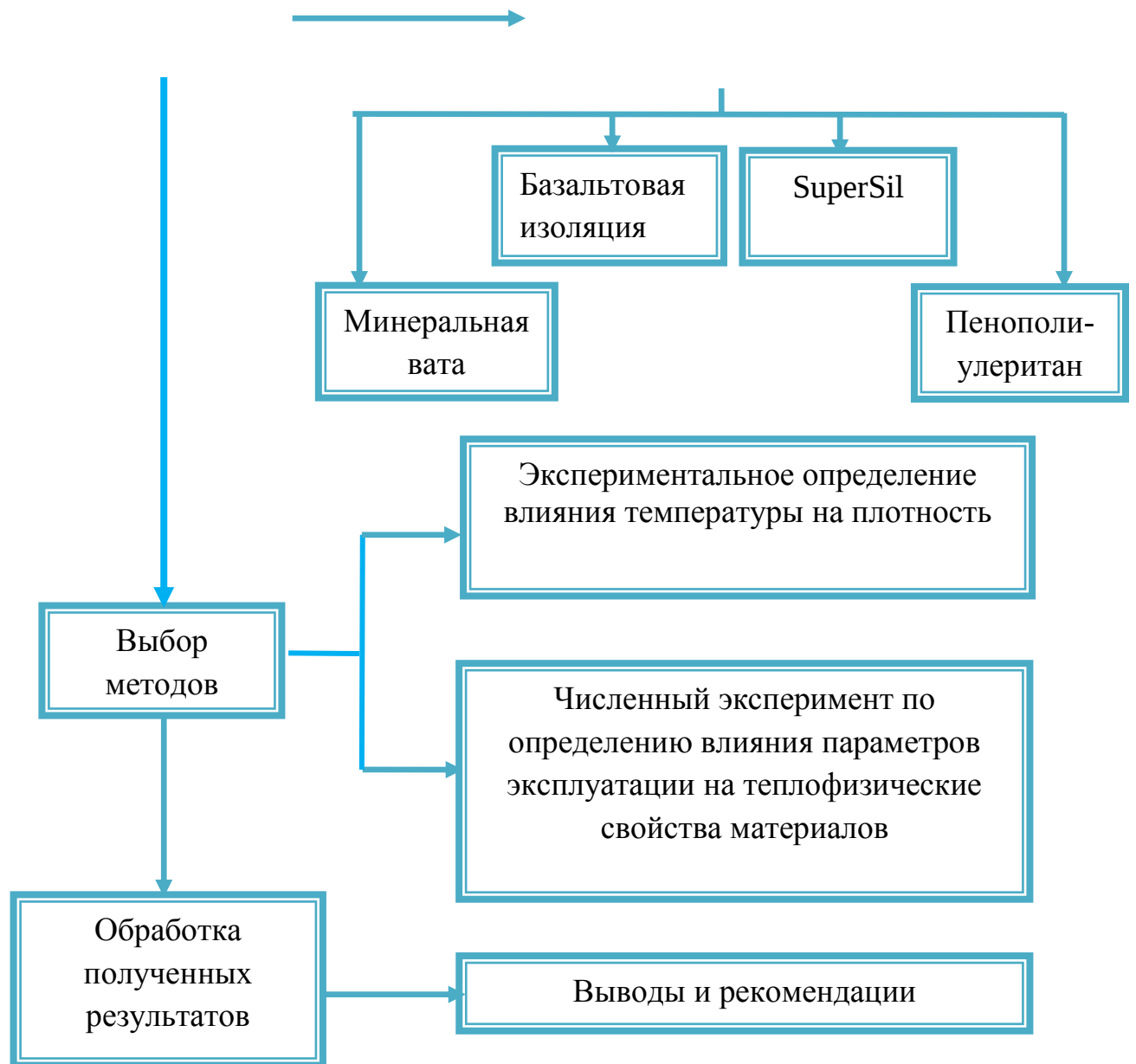


Рисунок 3.1 - Этапы проведения работы



Рисунок 3.2 - Штангенциркуль (150) мм



Рисунок 3.3 - Замер образца

Результаты замеров опытных образцов представлены в Таблице 2.1 и в Приложении А.

Таблица 3.1 – Размеры опытных образцов

№п/ п	Образец	Размеры		
		а (длина), см	б (ширина), см	с (высота), см
1	Supersil	7,93	6,74	2,43
2	Минеральная вата	7,34	6,6	2,96
3	Базальт	7,4	6,69	4,8
4	Полеулеритан	7,0	6,5	4,37

Взвешивание образцов производилось на лабораторных весах ВЛТЭ 2200 (Рисунки 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8).

Весы лабораторные ВЛТЭ 2200 предназначены для измерения массы предметов, сыпучих и жидких веществ.

Лабораторные весы серии ВЛТЭ могут применяться в научных и производственных лабораториях различных отраслей промышленности для высокоточного измерения массы твёрдых, сыпучих и жидких веществ. Наиболее активно применяются в химической, нефтехимической, пищевой, ювелирной, целлюлозно-бумажной, фармацевтической промышленности и медицине.



Рисунок 3.4 - Весы лабораторные ВЛТЭ 2200

В весах предусмотрены: цифровой отсчет, полуавтоматическая градуировка массы тары во всем диапазоне взвешивания. Эксплуатация весов производится в закрытых помещениях, при температуре окружающего воздуха от 10 до 35°C и относительной влажности от 30 до 80 %. Технические характеристики весов лабораторных ВЛТЭ 2200 представлены в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Технические характеристики весов лабораторных ВЛТЭ 2200

Наибольший предел взвешивания, г	2200
Дискретность, мг	50
Калибровка	внешняя
Размер чаши / платформы весов, мм	175×145
Наименьший предел взвешивания, г	2,5
Цена поверочного деления, мг	500
Среднеквадратическое отклонение, мг, не более	50
Пределы допускаемой погрешности при первичной поверке, мг	до 500г вкл.±50; св.500г до 2кг вкл. ±100
Класс точности согласно ГОСТ 24104-2001	II высокий
Юстировочная гиря	1 кг F2



Рисунок 3.5 - Взвешивание образца минеральной ваты



Рисунок 3.6 - Взвешивание SuperSil



Рисунок 3.7 - Взвешивание образца базальтовой изоляции



Рисунок 3.8 - Взвешивание образца полиуретана

Для перечисленных материалов был проведен нагрев и выдержка соответствующего образца в нагревательной печи при определенной температуре. Эксперимент проводился при следующих температурах: 200 °С, 300°С, 400 °С, 500°С, 600°С. Эксперимент был повторен при каждой температуре 5-6 раз.



Рисунок 3.9 - Нагрев образцов

Нагрев образцов изоляции проводился в электропечи ПКЛ-1,2-12 (Рисунок 3.9).

Электропечи сопротивления типа ПКЛ предназначены для нагрева, обжига, прокали и других термических процессов. Электропечи могут применяться в промышленных условиях в энергетической, машиностроительной, металлургической, огнеупорной, цементной, стекольной, химической, нефтяной и газовой промышленности, а также в органах сертификации, надзора и контроля за качеством продуктов и товаров. Электропечь рассчитана для работы при температуре окружающего воздуха от 10°C до 35°C и относительной влажности до 80% при температуре 25°C. Нагрев рабочей камеры электропечей типа ПКЛ производится спиральными нагревателями, расположенными вдоль стенок внутри рабочей камеры.

Особенности:

- ✓ хорошая теплоизоляция, обеспечивающая низкую температуру наружных стенок печи;
- ✓ электронный термоконтроллер для управления нагревом с цифровой индикацией температуры;
- ✓ защита от обрыва термопары;
- ✓ защита от превышения температуры.

Таблица 3.3 - Технические характеристики электропечи ПКЛ-1,2-12

ТИП	Т _{макс} , °C	Рабочее пространство, мм	Габаритные размеры, мм	Мощность/напряжение, кВт/В	Масса печи, кг
ПКЛ-1,2-12	1200	220×180×300	710×615×620	3,4/220	90

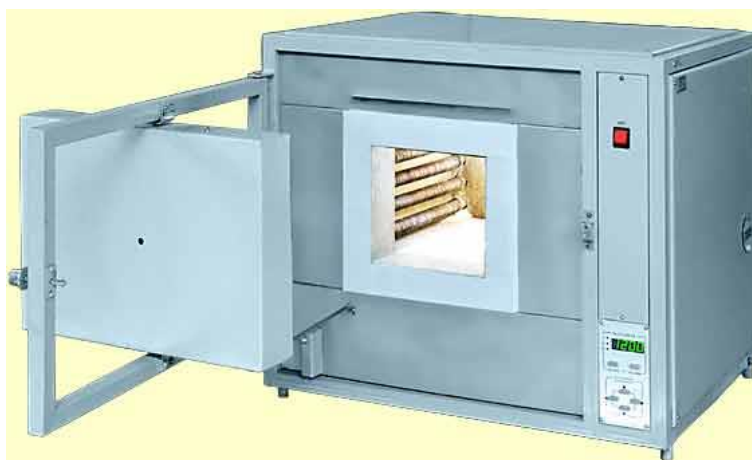


Рисунок 3.10– Лабораторная печь ПКЛ-1,2-12

Для минеральной ваты результаты эксперимента представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты эксперимента (минеральная вата)

Температура, °C	20	200	300	400	500	600
Плотность, кг/м ³	101,8	117	99,4	111,5	126,68	126,68

Для базальтовой изоляции результаты эксперимента представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.4 – Результаты эксперимента (базальтовая изоляция)

Температура, °C	20	200	300	400	500	600
Плотность, кг/м ³	163	161,8	141,5	135,2	141,9	156,96

Для материала SuperSil результаты эксперимента представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты эксперимента (Материал SuperSil)

Температура, °C	20	200	300	400	500	600
Плотность, кг/м ³	141	134	126,5	120,4	134,8	159,8

Расчеты плотности образцов тепловой изоляции проводились по полученным данным после взвешивания нагретого материала при определенной температуре.

3.1.2 Обработка результатов эксперимента

Обработка результатов экспериментов производилась стандартной программой Excel.

В результате математической обработки получены следующие зависимости (Рисунок 3.11, 3.12, 3.13).

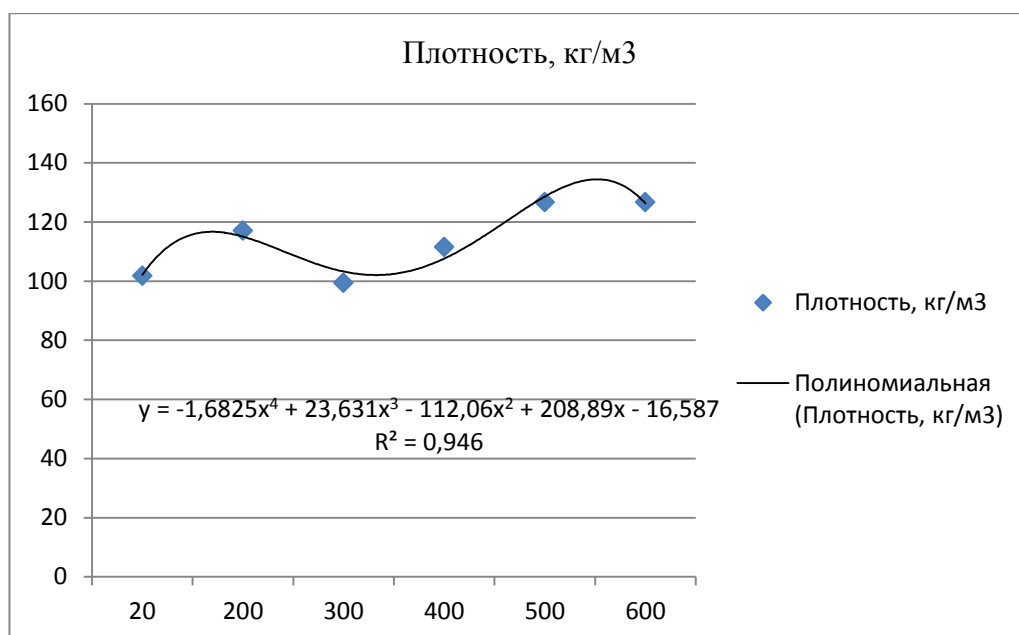


Рисунок 3.11 – Влияние температуры на плотность минеральной ваты

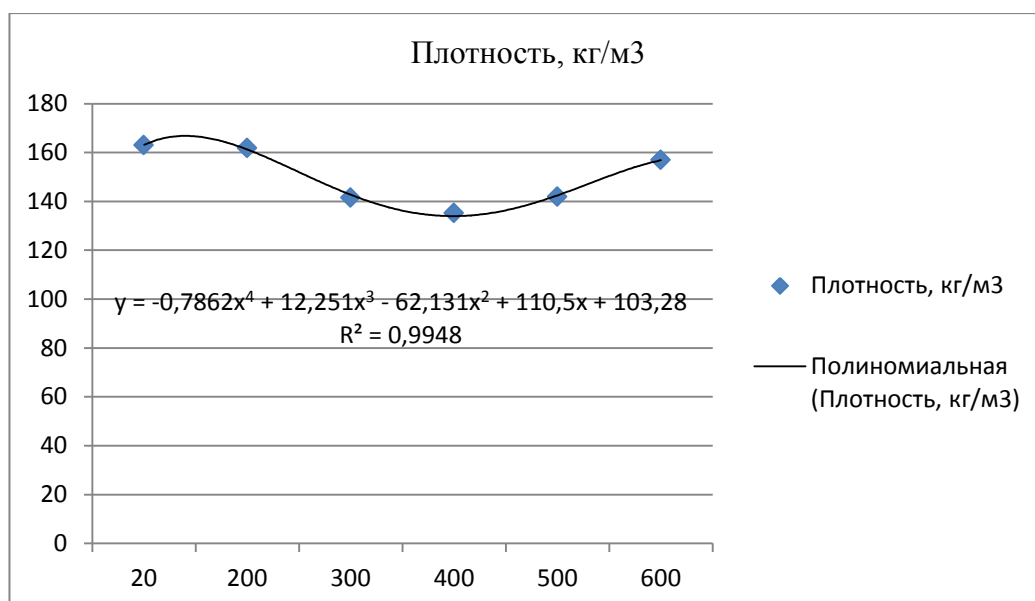


Рисунок 3.12 – Влияние температуры на плотность базальтовой изоляции

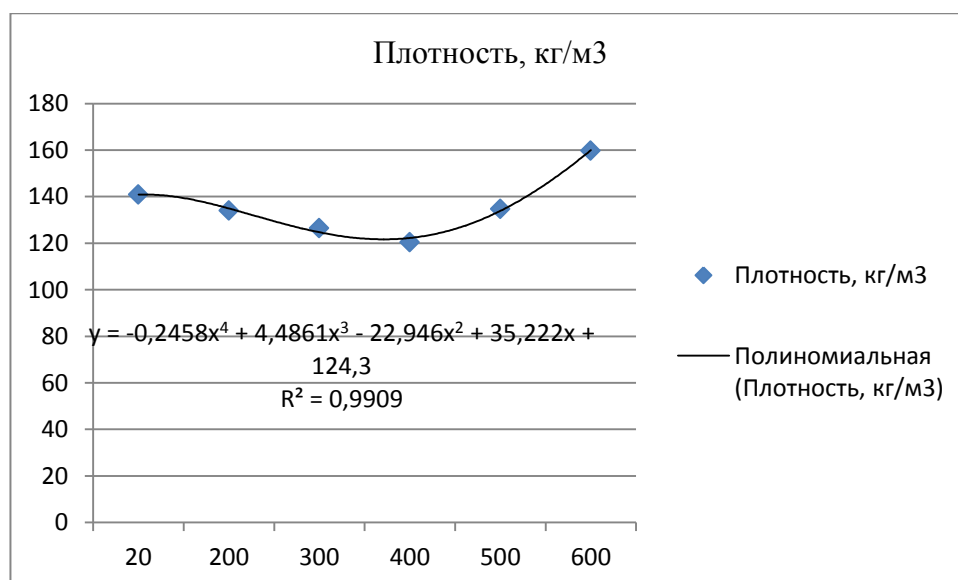


Рисунок 3.13 – Влияние температуры на плотность Материала SuperSil

Анализ полученных зависимостей показал, что с ростом температур нагрева плотность тепловой изоляции уменьшается, достигая минимума в зоне температур от 300°C до 400 °C. В этот период образцы материалов уменьшаются в массе, что объясняется удалением влаги, так и изменениями в самом материале. Эти изменения связаны с тем, что при длительной работе теплоизоляции при повышенных температурах происходит частичное выгорание связующего материала. В конечном итоге это приводит к снижению «прочности» самого материала.

Как правило, именно температурой применения регламентируется использование тепловой изоляции (на битумном связующем, на синтетическом связующем). Так в отличие от многих других минераловатных изделий базальтовое супертонкое волокно не содержит фенолформальдегидного связующего материала, что выгодно отличает его от подобных материалов (в отношении температуры применения). Производство теплоизоляционных материалов в виде минеральной ваты основано на выдувании из расплавленной базальтовой породы тончайшего волокна (диаметр – до 8 мкм, длина – от 2 до 10 мм), которое при смешивании с органическим связующим позволяет получать волокнистую структуру материала, прочно удерживающего в себе воздух.

Дальнейшее повышение температуры в эксперименте приводит к увеличению плотности материалов. Это объясняется существенной потерей объема вследствие происходящих структурных изменений исследуемыми образцами при температурах выше 400°C

В результате математической обработки были получены аналитические зависимости плотности теплоизоляционных материалов от температуры процесса.

- для минеральной ваты:

$$\rho = -1,682t^4 + 23,63t^3 - 112t^2 + 208,8t - 16,58 \quad (3.1)$$

- для базальтовой изоляции:

$$\rho = -0,786t^4 + 12,25t^3 - 62,13t^2 + 110,5t + 103,2 \quad (3.2)$$

- для Материала SuperSil:

$$\rho = -0,245t^4 + 4,486t^3 - 22,94t^2 + 35,22t + 124,3 \quad (3.3)$$

Регрессивный анализ позволил получить зависимости плотности от температуры в виде полинома четвертой степени с величиной достоверности R^2 от 0,946 до 0,994.

3.2 Планирование эксперимента по определению теплопроводности

При планировании эксперимента необходимо выделить независимые входные параметры и выходной параметр. В качестве выходного параметра используется теплопроводность материала, в качестве входных – температура, плотность, влажность и структура. Для получения зависимости планируется использовать уравнение регрессии вида

$$y(b, x) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n b_{ik} x_i x_k + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n b_{ikl} x_i x_k x_l + \dots + b_{12\dots n} x_1 x_2 \dots x_n, \quad (3.4)$$

где b_0 - свободный член, равный выходу при $x=0$;

b_i - коэффициент регрессии, указывающий на влияние фактора на процесс;

b_{ij} - коэффициенты регрессии, определяющие степень воздействия на процесс взаимодействия факторов.

Определив коэффициенты регрессии этого уравнения, получим представление о влиянии изучаемых факторов на величину тепловых потерь, о взаимодействии факторов и о направлении движения к оптимальной области.

Таким образом, алгоритм задачи факторного эксперимента сводится к следующим операциям:

- 1) выбору уравнения регрессии;

- 2) составлению плана многофакторного эксперимента;
- 3) расчету коэффициентов регрессии, оценка значимости этих коэффициентов;
- 4) анализу уравнения регрессии.

Уравнение регрессии записывается в зависимости от числа изучаемых факторов, определяющих процесс.

При составлении матрицы планирования исходят из того, что в данном эксперименте должны быть исчерпаны все возможные комбинации значений факторов. При определении оценок параметров модели часто оказывается возможным свободно выбирать условия проведения опытов в пределах некоторых границ. Выбор числа и условий проведения экспериментов, обеспечивающих получение наилучшего числа в определенном смысле результата исследования, и составляет цель планирования эксперимента.

Для каждого отдельного вида материала, исходя из анализа оценки влияния различных факторов на теплопроводность, представленного в главах 1 и 2, в качестве факторов эксперимента выбираем:

x_1 — плотность, кг/м³;

x_2 —температура, °С;

x_3 — влажность, %.

Влажность изоляционного материала при эксплуатации высокотемпературных агрегатов не будет столь актуальной, в связи с чем, данный фактор можно опустить.

Из физических соображений можно предположить, что взаимосвязь (3.4) имеет следующий вид:

$$y(b, x) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 \quad . \quad (3.5)$$

Необходимое число опытов: $N=2^n$, где n — количество исследуемых факторов.

Как было уже сказано выше, количество основных факторов, влияющих на величину теплопроводности, равно 2. Поэтому количество взаимодействий $N = 2^n = 2^2 = 4$.

Расчет коэффициентов регрессии ведется по следующим формулам

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j x_i^j, i = 0, \dots, n$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j x_i^j \dots x_{\mu}^j, i, \mu = 1, 2, \dots, n,$$
(3.6)

где $\bar{y}_j$ - значение среднего выхода процесса в j -ом варианте;

x_i^j - значение фактора в j -ом варианте.

В таблице 3.7 представлены интервалы варьирования факторов эксперимента для минеральной ваты.

Таблица 3.7 – Интервалы варьирования факторов эксперимента для минеральной ваты

Факторы	Основной уровень ($x_i = 0$)	Интервал варьирования	Верхний уровень ($x_i = +1$)	Нижний уровень ($x_i = -1$)
x_1	113,05	13,65	126,7	99,4
x_2	220	180	400	40

Верхний и нижний уровни - это предельные значения варьируемых переменных. Область планирования эксперимента: $-1 \leq x_i \leq 1$. Это было получено путем перехода к безразмерным переменным или к, так называемому кодированию факторов

$$x_i = \frac{a_i - \overline{a_i}}{|\Delta a_i|}, \quad (3.7)$$

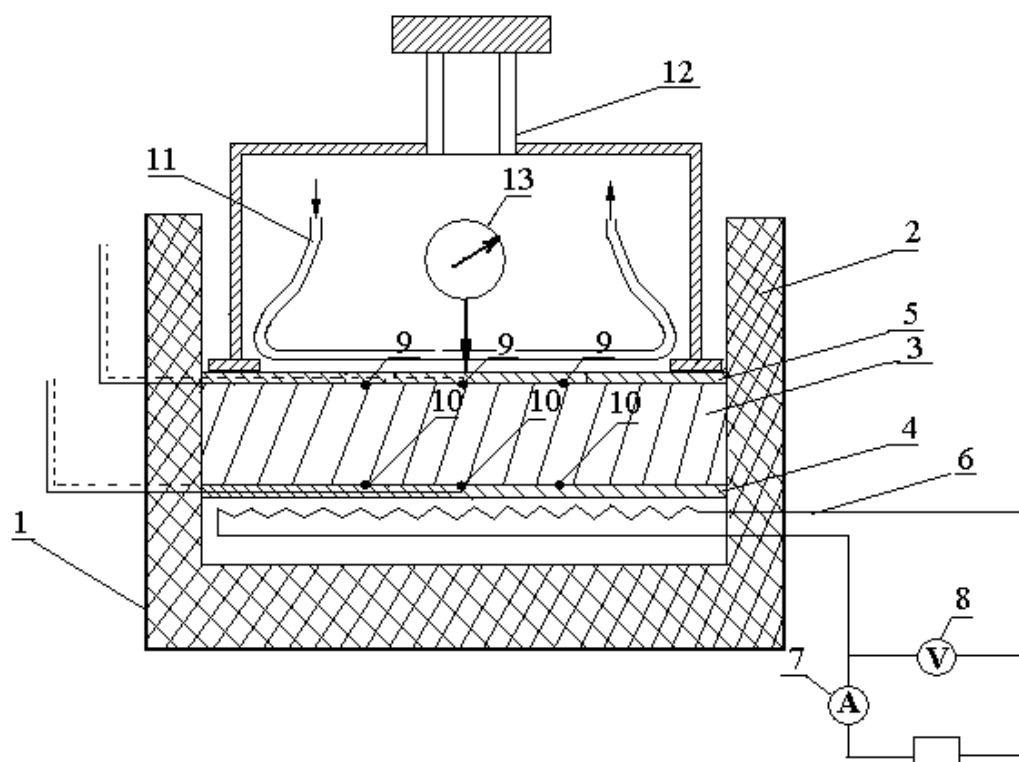
где a_i - фактор (значение i -той переменной в натуральном масштабе измерения);

$\overline{a_i}$ - средний уровень;

$|\Delta a_i|$ - шаг варьирования.

Для получения данных о влиянии различных факторов на теплопроводность изоляционного материала был использован стенд (рисунок 3.16), состоящий из металлического корпуса 1, заполненного тепловой изоляцией 2 для снижения тепловых потерь в окружающую среду[54].

Исследуемый материал 3 помещается между обогреваемой и охлаждаемой пластинами 4 и 5 соответственно. Нагревание производится при помощи электронагревателя в виде плоской плитки 6; мощность электронагревателя определяется по показаниям амперметра 7 и вольтметра 8. Температура нагреваемой поверхности исследуемого материала измеряется тремя термопарами 9, температура охлаждаемой поверхности - термопарами 10. Охлаждение материала производится за счет холодильника 11, в котором циркулирует охлаждающая вода. Механическая нагрузка создается посредством механизма поджима 12, толщина слоя материала измеряется штангенциркулем 13. Основание цилиндра также теплоизолировано. Это повышает среднюю температуру измерения, уменьшает искажение температуры на холодной стороне поверхности материала и снижает рассеяние тепла в окружающую среду.



1-корпус; 2-тепловая изоляция; 3-исследуемый материал; 4-обогреваемая пластина; 5-охлаждаемая пластина; 6-электронагреватель; 7-амперметр; 8-вольтметр; 9,10-термопары; 11-холодильник; 12-механизм поджима; 13-цифровой штангенциркуль.

Рисунок 3.16. Схема экспериментальной установки

Цепь измерения температур состоит из термопар, переключателя термопар и универсального восьмиканального измерителя-регулятора ОВЕН ТРМ 138, показания которого выводятся на компьютер. К основным достоинствам термопар относятся их простота и универсальность. При выборе материалов для термопар необходимо стремиться к тому, чтобы они позволяли получить большую термо-э.д.с. и чтобы свойства термопары незначительно изменялись при повторных нагреваниях. Поэтому в данном эксперименте применяются хромель-копелевые термопары, работающие при температурах до 800 °С[54].

3.2.1 Обработка результатов эксперимента

Для анализа влияния структуры изоляционного материала на его коэффициент теплопроводности были взяты: 1) прошивной мат из минеральной ваты марки 100 и 150 (ГОСТ-21880-94); 2) материал SuperSIL; 3) маты прошивные базальтовые ТУ 5769-001-73902414-2005.

Образцы исследуемых материалов были помещены в экспериментальную установку и были определены коэффициенты теплопроводности данных волокнистых материалов в зависимости от различных вариантов факторов.

Расчет ведем на ЭВМ по разработанной программе для определения этих коэффициентов (язык программирования – Паскаль). Кроме расчета

регрессионных коэффициентов программа определяет сумму квадратов ошибок и определяет адекватность модели (Приложение Б).

Таблица 3.8 - Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Планирование				Выход
№	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	y , Вт/м°C
1	+	+	+	+	0,131
2	+	-	+	-	0,126
3	+	+	-	-	0,051
4	+	-	-	+	0,048
b_i	0,098	25,36	-19,28	7,89	

Таким образом, интерполяционная формула (3.5) для минеральной ваты имеет следующий вид

$$y = 0,098 - 19,28x_1 + 25,36x_2 + 7,89x_1x_2. \quad (3.8)$$

Используя данную методику, были исследованы теплопроводности и других материалов. Интерполяционная формула для базальтовой изоляции имеет следующий вид

$$y = 0,038 - 25,78x_1 + 36,54x_2 + 11,22x_1x_2. \quad (3.9)$$

Интерполяционная формула для материала SuperSil имеет следующий вид

$$y = 0,138 - 14,55x_1 + 21,33x_2 + 6,46x_1x_2. \quad (3.10)$$

Выводы:

1. Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов возрастает с повышением температуры, поскольку увеличивается теплопроводность, как твердых составных частей материалов, так и воздуха, заполняющего поры
2. Анализ полученных зависимостей показал, что с ростом температур нагрева плотность тепловой изоляции уменьшается, достигая минимума в зоне температур от 300°C до 400 °C. В этот период образцы материалов уменьшаются в массе, что объясняется удалением влаги, так и изменениями в самом материале. Эти изменения связаны с тем, что при длительной работе теплоизоляции при повышенных температурах происходит частичное

выгорание связующего материала. В конечном итоге это приводит к снижению «прочности» самого материала.

3. Регрессивный анализ позволил получить зависимости плотности от температуры в виде полинома четвертой степени с величиной достоверности R^2 от 0,946 до 0,994.

4. Полученные методом планирования эксперимента зависимости теплопроводности от плотности и температуры материала показывают примерно равное влияние этих факторов на выход эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной диссертации приведены новые научно обоснованные результаты, использование которых необходимо при расчете эффективной толщины тепловой изоляции для высокотемпературных агрегатов. Предложены

рекомендации по практическому применению полученных автором научных результатов.

Краткие выводы по результатам диссертационных исследований

1. Анализ объемов применения изоляционных материалов в зависимости от температуры применения показал, что около 25 % применяемой промышленной изоляции работает при температурах от +200°C до +400°C, а пять процентов изоляции работает в пределах температур от +400°C до +600°C, свыше +600°C работает всего 0,1% изоляции.

2. Анализ применения в промышленности тепловой изоляции показал, что большая часть промышленной тепловой изоляции монтируется из волокнистых материалов 80-85%.

3. Анализ качества материалов показал, что базальтовые волокна (тонкие, супертонкие), лучше по показателям, чем искусственные стеклянные и подшихтованные минеральные

4. Изученный материал об условиях работы теплотехнического оборудования дает право утверждать, что в котлах с естественной циркуляцией в области топочной камеры, в области размещения пароперегревателя, поворотной камере и начале конвективной шахты условия для работы ограждений более тяжелые.

5. На основе приведенных данных можно сделать вывод, что огнеупорные материалы футеровки печей эксплуатируются в тяжелых температурных условиях. Стойкость кладки в печах составляет лишь 150-200 суток и в среднем 7%

6. Изученный материал дает основание сделать вывод, что процессы нагрева и охлаждения в различных участках по толщине футеровки могут не совпадать по времени. Несовпадающие по времени температурные изменения в различных слоях футеровки приводят к возникновению различных по знаку термических напряжений, которые ведут к ее разрушению и деформации, а следовательно, и тепловой изоляции входящей в футеровку

7. Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов возрастает с повышением температуры, поскольку увеличивается теплопроводность, как твердых составных частей материалов, так и воздуха, заполняющего поры

8. Анализ полученных зависимостей показал, что с ростом температур нагрева плотность тепловой изоляции уменьшается, достигая минимума в зоне температур от 300°C до 400 °C. В этот период образцы материалов уменьшаются в массе, что объясняется удалением влаги, так и изменениями в самом материале. Эти изменения связаны с тем, что при длительной работе теплоизоляции при повышенных температурах происходит частичное выгорание связующего материала. В конечном итоге это приводит к снижению «прочности» самого материала.

9. Регрессивный анализ позволил получить зависимости плотности от температуры в виде полинома четвертой степени с величиной достоверности R^2 от 0,946 до 0,994.

10. Выведены аналитические зависимости плотности теплоизоляционных материалов от температуры процесса:

- для минеральной ваты:

$$\rho = -1,682t^4 + 23,63t^3 - 112t^2 + 208,8t - 16,58$$

- для базальтовой изоляции:

$$\rho = -0,786t^4 + 12,25t^3 - 62,13t^2 + 110,5t + 103,2$$

- для материала SuperSil:

$$\rho = -0,245t^4 + 4,486t^3 - 22,94t^2 + 35,22t + 124,3$$

11. Полученные методом планирования эксперимента зависимости теплопроводности от плотности и температуры материала показывают примерно равное влияние этих факторов на выход эксперимента.

Разработка рекомендаций и исходные данные по конкретному использованию результатов исследований

На основании экспериментальных исследований и регрессионального анализа выявлен характер изменения эффективной теплопроводности изоляции в зависимости от плотности и вида волокна при повышенных температурах для различных типов волокнистых материалов.

- для минеральной ваты:

$$\rho = -1,682t^4 + 23,63t^3 - 112t^2 + 208,8t - 16,58$$

- для базальтовой изоляции:

$$\rho = -0,786t^4 + 12,25t^3 - 62,13t^2 + 110,5t + 103,2$$

- для материала SuperSil:

$$\rho = -0,245t^4 + 4,486t^3 - 22,94t^2 + 35,22t + 124,3$$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Основные направления развития производства эффективных теплоизоляционных материалов. [Информационный ресурс]: <http://msd.com.ua/stroitelnie-stati-1996/osnovnye-napravleniya-razvitiya-proizvodstva-effektivnyx-teploizolyacionnyx-materialov>

2. Руденко В.В., Панин А.С., Жолудов В.С., Ставрицкая Л.В. Тепловая изоляция в промышленности и строительстве. - М., 1996.

3. Жолудов В.С. Повышение теплозащитных свойств теплоизоляционных конструкций из волокнистых материалов для промышленных сооружений. – М., 2000. – 136 с.

4. Преимущества применения вспененного каучука в качестве низкотемпературной атмосферной теплоизоляции.

[Информационный ресурс]: <http://www.k-flex.su/usr/file/Publikacii/dlia%20nizk%20temperatur.pdf>.

5. Руденко В.В., Панин А.С., Жолудов В.С., Ставрицкая Л.В. Тепловая изоляция в промышленности и строительстве. - М., 1996.

6. Пик М.М., Корытников В.П. Современное состояние и перспективы развития теплофикации. Теплоэнергетика. - 1972. -№ 4.

7. Оснос С.П., Котлицкая Ю.И. Энергосбережение при применении современных волокнистых огнеупорных и теплоизоляционных материалов и систем отопления в промышленности. [Информационный ресурс]: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=436

8. [Информационный ресурс]: <http://proizvodim.com/osnovnye-napravleniya-razvitiya-proizvodstva-effektivnyx-teploizolyacionnyx-materialov.html>

9. Статистический сборник. «Промышленность Казахстана и его регионов» 2008-2012. Астана, 2013.

[Информационный ресурс]: <http://www.stat.gov.kz>

10. Футеровка термического оборудования. [Информационный ресурс]: <http://thermal-ceramics.zakupka.com/articles/1101-futirovka-termicheskogo-oborudovaniya/>

11. Волокнистая теплоизоляция. [Информационный ресурс]: <http://www.enresurs.com/art-10.html>

12. Тепловая изоляция. [Информационный ресурс]: http://evrostroy.biz/useful_info.html.html?cid=2&itemid=3

13. Кривандин В.А., Филимонов Ю.П. Теория. Конструкции и расчеты металлургических печей. Том 1, 1969. - М. – 169 с

14. Воронков С.Т., Исэров Д.З. Тепловая изоляция энергетических установок. - М.: Высш. школа, 1974. – 31 с

15. Шойхет Б.М., Ставрицкая Л.В. Журнал "Энергосбережение". Тепловая изоляция металлических стволов дымовых труб, 2001.

16. Овчаренко Е.Г., Артемьев В. М., Шойхет Б. М., Жолудов В. С. Тепловая изоляция и энергосбережение. [Информационный ресурс]: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=202

17. Георгиевский Н.Н. Журнал русского физ.хим.об-ва. XXXV, 1903.

18. Wologdine S. Revue de Metallurgie, 1999. -№ 6. – 46 с.

19. Серебровский А.П. Теория и практика термоизоляции, 1911. – 22 с.

20. Орлов А.А. Холодильные склады, 1912. – 20 с.

21. Лапшин Б.С. Справочник по центральной системе отопления и вентиляции, 1913. – 15 с.

22. Кауфман Б.Н. Теплопроводность строительных материалов. – М., 1995. - 4 с.

23. Kammerer I. Mitt. Forsch. fur WarmeschutzjNL, - 1925. - №4.

24. Kammerer I. War- meu. Kalteschutz in der Industrie, 1936.
25. Григорьев В.С. Производство и применение минеральной ваты. - Стройиздат, 1947. - 6 с.
26. Жилин А.И., Гаврилов Е. К. Шлаковая вата. Стройиздат, 1996. – 85 с.
27. Лагунов Г.Л. Свойства и технология шлаковых строительных материалов. Промстройиздат, 1949.- 14 с
28. Allcut E. Heating, piping and air cond“. № 5, 1937; .ling. Journal № 1, 1937. - 32.
29. Griffiths E. Heat Insulators, 1929; Thermal conduct, of some industr. materials, 1942. - 35 с.
30. Воронков С.Т., Исэров Д.З. Обмуровка парогенераторов тепловых электростанций: учебник для подгот. рабочих на производстве. – изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1995. - 271 с.
31. Троянкин Ю.В., Куликова О.В. Методика расчета теплотерь от наружных поверхностей ограждений тепловых установок. Промышленная энергетика., 2000. - № 10. - 50-51 с.
32. Строительный вестник. Минеральная вата. [Информационный ресурс]: <http://sv18.ru/news/minvata>
33. ГОСТ 4640-2011 Вата минеральная. Технические условия
34. ГОСТ 9573-2012 «Плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем теплоизоляционные»
35. ГОСТ 21880-94 «Маты прошивные из минеральной ваты теплоизоляционные»
36. ГОСТ 22950-95 «Плиты минераловатные повышенной жесткости на синтетическом связующем. Технические условия»
37. ГОСТ 21880-2011 «Маты из минеральной ваты прошивные теплоизоляционные. Технические условия»
38. Сравнительные характеристики теплоизоляционных материалов из базальтового волокна. [Информационный ресурс]: <http://www.teplo-v-dom.net/arhiv/text.php?rubrika=2&text=15&stranica=2>
39. [Информационный ресурс]: <http://www.etnotrade.ru/ogneszashhita/supersil/>
40. Бойко Е.А. Котельные установки и парогенераторы., 2005. – 253 с.
41. Любов В.К. Изучение особенностей горения крупных частиц натурального топлива с целью повышения эффективности работы вихревых топок, 1984.
42. Влияние коэффициента избытка воздуха на экономичность работы котла агрегата. [Информационный ресурс]: <http://auditnorma.ru/vliyanie-koefficienta-izbytk-a-vozduxa-na-ekonomichnost-raboty-kotloagregata>
43. Никифоров А.С., Приходько Е.В. Анализ работы футеровок 25-тонных сталеразливочных ковшей. Вестник Павлодарского государственного университета, 2004. - №4. - 14-18 с.
44. Шкляр Ф.Р., Сургучёва Е.Л. Расчёт тепловых потерь реальной кладки. Известия ВУЗов. Чёрная металлургия, 1985. - №2. - 101-103 с.

45. Герасименко И.П. О механизме износа футеровки сталеплавильных Агрегатов. Известия ВУЗов. Чёрная металлургия, 1993. - №8. - 17-18 с.
46. Никифоров А.С. Надежность работы футеровок металлургических печей, 2003.
47. Никифоров А.С., Алькенов А.А. Анализ термонапряженного состояния футеровки печей кальцинации. Цветные металлы, 1974. – 31 с.
48. Приходько Е.В. Тепловая работа высокотемпературных агрегатов, 2009. – 67-74 с.
49. Сасса В.С. Футеровка индукционных плавильных печей и миксеров, 1983.
50. Классификация огнеупоров и теплоизоляционных материалов. [Информационный ресурс]: <http://aktem.com.ua/refractories/137-klassifikaciya-ogneuporov-i-teploizolyacionnyh-materialov.html>
51. Шведов В.Ф. Теплопроводность низкотемпературной изоляции. Холодильная техника, 2006. - №1.
52. Кришер О. Научные основы техники сушки. - М., 1961.
53. Киселев И.Я. Зависимость теплопроводности современных теплоизоляционных строительных материалов от плотности, диаметра волокон или пор, температуры. Строительные материалы, 2003. - №7. - 17–18 с.
54. А.с.19875 Республика Казахстан. МКИ G01N25/18. Способ определения коэффициента теплопроводности волокнистого материала / Кинжибекова А.К., Приходько Е.В., Никифоров А.С., Никонов Г.Н. Заявл. 08.02.07; Оpubл. 15.08.08. Бюл. № 8.- 3 с

Приложение А

Результаты замеров опытных образцов

Таблица А.1 Размеры опытных образцов при температуре 20 °С

№ п/ п	Образец	Размеры, см			Масса, г	Объем, см ³	Плотн ость, кг/м ³
		а (длина)	б (ширина)	с (высота)			
1	Supersil	7,93	6,74	2,43	18,5	129,879	142

2	Минеральная вата	7,34	6,6	2,96	14,6	143,394	101,8
3	Базальт	7,4	6,69	4,8	38,7	237,629	163

Таблица А.2 Размеры опытных образцов после нагрева при температуре 200 °С

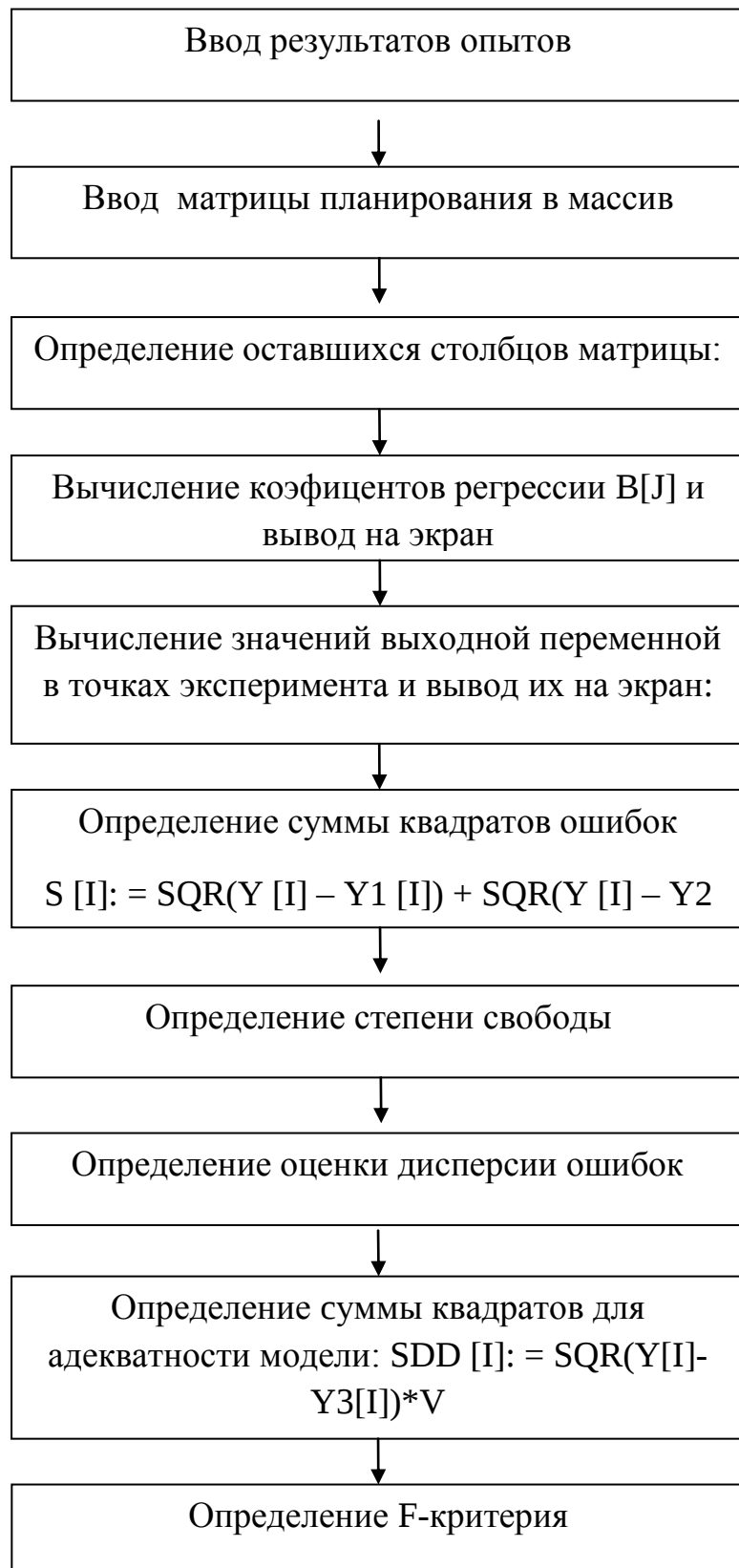
№ п/ п	Образец	Размеры, см			Масса, г	Объем, см ³	Плотность, кг/м ³
		а (длина)	б (ширина)	с (высота)			
1	Supersil	7,9	6,75	2,55	18,25	135,979	134
2	Минеральная вата	7,41	6,6	2,55	14,6	124,71	117
3	Базальт	7,2	6,3	6,3	38,45	237,629	161,8

Таблица А.3 Размеры опытных образцов после нагрева при температуре 300 °С

№ п / п	Образец	Размеры, см			Масса, мг	Объем, см ³	Плотность, кг/м ³
		а (длина)	б (ширина)	с (высота)			
1	Supersil	7,85	6,66	2,54	16,8	132,794	126,5
2	Минеральная вата	7,66	6,66	2,87	14,55	146,415	99,4
3	Базальт	7,38	6,1	5,94	37,85	267,4	141,5

Приложение Б

Алгоритм программы расчета коэффициентов регрессии



На правах рукописи

Кармишина Лидия Васильевна

**Влияние работы высокотемпературных агрегатов
на характеристики теплоизоляционных материалов**

6M071700 – Теплоэнергетика

Реферат
диссертации на соискание академической
степени магистра технических наук

Республика Казахстан
Павлодар, 2014

Работа выполнена в Инновационном Евразийском университете

Научный руководитель:

кандидат технических наук,
А.К. Кинжибекова

Официальный оппонент:

кандидат технических наук,
Доцент Глазырин А.А.

Секретарь государственной
аттестационной комиссии
магистр теплоэнергетики

Ш.М. Шупеева

Реферат

Диссертация магистра технических наук содержит 73 страницы, 34 рисунка, 22 таблиц, 54 литературных источника.

Влияние работы высокотемпературных агрегатов на свойства тепловой изоляции

Цель работы. исследование влияния условий работы высокотемпературных агрегатов на теплофизические характеристики теплоизоляционных материалов.

Актуальность исследования заключается в исследовании свойств теплоизоляционных материалов в условиях высоких температур.

Актуальность проблемы обусловлена тем, что одной из наиболее острых проблем развития топливно-энергетического комплекса страны является проблема энергосбережения. От ее успешного решения во многом зависит жизнеспособность экономики страны. Значительная роль в выполнении программы энергосбережения призвана сыграть высокоэффективная тепловая изоляция, применяемая во всех областях промышленного производства.

Задачи исследования:

1. Изучить характеристики и классификацию тепловой изоляции применяемой при эксплуатации высокотемпературных агрегатов.
2. Произвести анализ влияния условий работы высокотемпературных агрегатов на основные характеристики теплоизоляционных материалов.
3. Исследовать условия работы высокотемпературных агрегатов.
4. Провести экспериментальное исследование с целью определения влияния температуры процесса на плотность теплоизоляционного материала.
5. Провести экспериментальное исследование влияния параметров эксплуатации на теплопроводность минераловатных теплоизоляционных материалов.

Объектом исследования является. Тепловая изоляция, используемая в работе высокотемпературных агрегатов.

Научная новизна исследования. Экспериментально изучено влияние температуры нагрева на плотность теплоизоляционного материала, а значит и на величину тепловых потерь. Проведена оценка влияния параметров процесса на эффективность теплозащитных свойств теплоизоляционного материала.

Практическая значимость исследования:

В результате исследования был изучен механизм теплопроводности в волокнистых материалах и позволяющий определять теплозащитные свойства конструкций в зависимости от температурных режимов эксплуатации, физико-технических свойств волокнистой изоляции (теплопроводности, плотности и диаметра волокна). Это позволит оптимизировать процесс при расчете эффективной толщины тепловой изоляции.

На защиту выносятся следующие методы:

1. Зависимости плотности исследуемых теплоизоляционных материалов от температуры
2. Зависимости влияния эксплуатационных факторов на теплопроводность исследуемых теплоизоляционных материалов

Апробация работы. По материалам работы имеется одна публикация в научном журнале «Вестник» Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева.

Результаты работы докладывались на Международной научной конференции молодых ученых, магистрантов и студентов «XIII Сатпаевские чтения» Павлодарского Государственного университета имени С.Торайгырова.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы, сформулирована цель работы, дана общая характеристика поставленной задачи, обозначена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор существующих и перспективных теплоизоляционных материалов. Рассмотрены основные виды теплоизоляционных материалов. Раскрыты основные проблемы связанные с применением теплоизоляционных материалов. Проведен анализ существующей литературы и научно-исследовательских работ в данной области.

Известно, что до 80 – 85% энергоносителей в промышленно развитых странах расходуется в промышленности и энергетике при эксплуатации промышленных печей, термического и энергетического оборудования. Поэтому в настоящее время задача экономии энергоресурсов, особенно, в энергоемких отраслях промышленности: металлургии, машиностроении, химической промышленности, на предприятиях, производящих строительные материалы и керамику, в энергетике стоит необычайно остро и актуально

Выводы:

1. Анализ объемов применения изоляционных материалов в зависимости от температуры применения показал, что около 25 % применяемой промышленной изоляции работает при температурах от +200°C до +400°C, а пять процентов изоляции работает в пределах температур от +400°C до +600°C, свыше +600°C работает всего 0,1% изоляции.

2. Анализ применения в промышленности тепловой изоляции показал, что большая часть промышленной тепловой изоляции монтируется из волокнистых материалов (минераловатные и стекловолокнистые изделия) 80-85%

Во второй главе проведён анализ условий работы высокотемпературных агрегатов на основные характеристики теплоизоляционных материалов. Определены основные характеристики теплоизоляционных материалов. Подробно изучена характеристика работы теплоэнергетического оборудования.

А также характеристика работы металлургических печей. Изучено влияние высоких температур на теплофизические свойства теплоизоляционных материалов. Проанализировано: влияние объемной массы и размера пор на теплопроводность тепловой изоляции, влияние толщины волокон на коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов, влияние температуры на коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала

Выводы:

1. Изученный материал об условиях работы теплотехнического оборудования дает право утверждать, что в котлах с естественной циркуляцией в области топочной камеры, в области размещения пароперегревателя, поворотной камере и начале конвективной шахты условия для работы ограждений более тяжелые.
2. На основе приведенных данных можно сделать вывод, что огнеупорные материалы футеровки печей эксплуатируются в тяжелых температурных условиях. Стойкость кладки в печах составляет лишь 150-200 суток и в среднем 7%
3. Изученный материал дает основание сделать вывод, что процессы нагрева и охлаждения в различных участках по толщине футеровки могут не совпадать по времени. Несовпадающие по времени температурные изменения в различных слоях футеровки приводят к возникновению различных по знаку термических напряжений, которые ведут к ее разрушению и деформации, а следовательно, и тепловой изоляции входящей в футеровку

В третьей главе проведено экспериментальное исследование температуры процесса на плотность теплоизоляционного материала.

В связи с этим был проведен ряд экспериментов по определению влияния температуры материала на его плотность.

Исследования проводились в лаборатории «Метрологии» на базе кафедры «Энергосберегающие технологии» Инновационного Евразийского Университета.

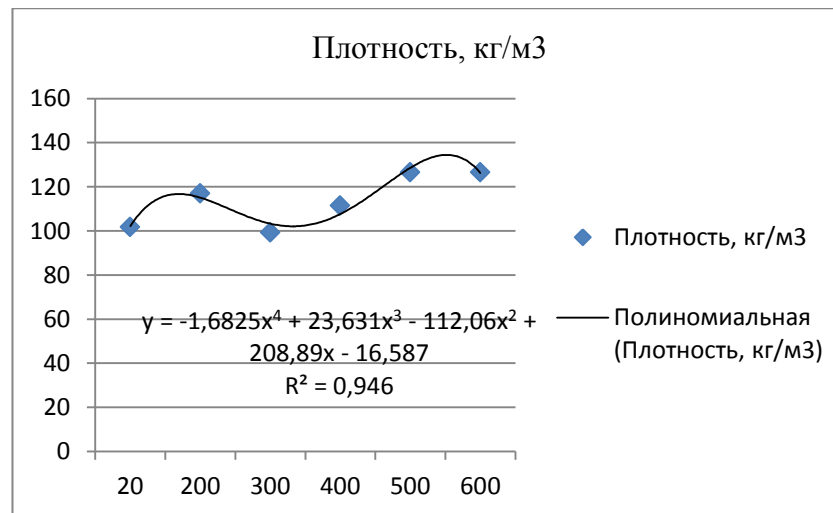
Объектом исследования являются образцы минеральной ваты, базальтовой изоляции, SuperSil и полиуретана (Рисунок 2.1). Первым этапом эксперимента была подготовка, замер образцов, расчет плотности при температуре окружающей среды +20 °С.

Для перечисленных материалов был проведен нагрев и выдержка соответствующего образца в нагревательной печи при определенной температуре. Эксперимент проводился при следующих температурах: 200 °С, 300°С, 400 °С, 500°С, 600°С. Эксперимент был повторен при каждой температуре 5-6 раз.

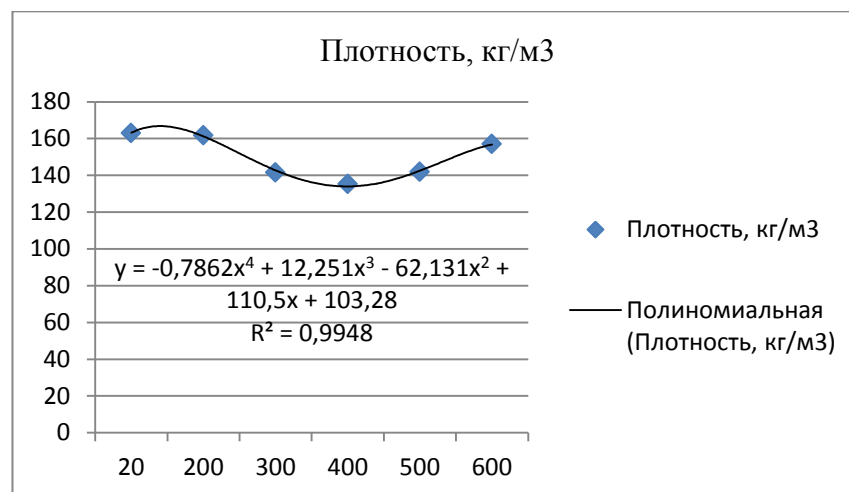
Расчеты плотности образцов тепловой изоляции проводились по полученным данным после взвешивания нагретого материала при определенной температуре.

Обработка результатов экспериментов производилась стандартной программой Excel.

В результате математической обработки получены следующие зависимости



Влияние температуры на плотность минеральной ваты



Влияние температуры на плотность базальтовой изоляции

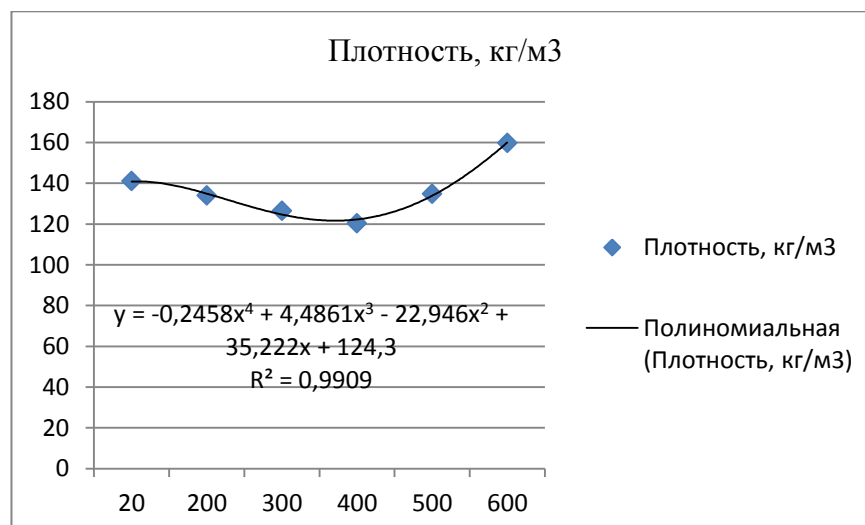


Рисунок 3.13 – Влияние температуры на плотность Материала SuperSil

Выводы:

1. Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов возрастает с повышением температуры, поскольку увеличивается теплопроводность, как твердых составных частей материалов, так и воздуха, заполняющего поры
2. Анализ полученных зависимостей показал, что с ростом температур нагрева плотность тепловой изоляции уменьшается, достигая минимума в зоне температур от 300°C до 400 °C. В этот период образцы материалов уменьшаются в массе, что объясняется удалением влаги, так и изменениями в самом материале. Эти изменения связаны с тем, что при длительной работе теплоизоляции при повышенных температурах происходит частичное выгорание связующего материала. В конечном итоге это приводит к снижению «прочности» самого материала.
3. Регрессивный анализ позволил получить зависимости плотности от температуры в виде полинома четвертой степени с величиной достоверности R^2 от 0,946 до 0,994.
4. Полученные методом планирования эксперимента зависимости теплопроводности от плотности и температуры материала показывают примерно равное влияние этих факторов на выход эксперимента.

В заключении указаны основные выводы полученные входе выполнения диссертационной работы

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Основные направления развития производства эффективных теплоизоляционных материалов.
[Информационный ресурс]: <http://msd.com.ua/stroitelnie-stati-1996/osnovnye-napravleniya-razvitiya-proizvodstva-effektivnyx-teploizolyacionnyx-materialov>
2. Руденко В.В., Панин А.С., Жолудов В.С., Ставрицкая Л.В. Тепловая изоляция в промышленности и строительстве. - М., 1996.
3. Жолудов В.С. Повышение теплозащитных свойств теплоизоляционных конструкций из волокнистых материалов для промышленных сооружений. – М., 2000. – 136 с.
4. Преимущества применения вспененного каучука в качестве низкотемпературной атмосферной теплоизоляции.
[Информационный ресурс]: <http://www.k-flex.ru/usr/file/Publikacii/dlia%20nizk%20temperatur.pdf>.
5. Руденко В.В., Панин А.С., Жолудов В.С., Ставрицкая Л.В. Тепловая изоляция в промышленности и строительстве. - М., 1996.
6. Пик М.М., Корытников В.П. Современное состояние и перспективы развития теплофикации. Теплоэнергетика, 1972. -№ 4.
7. Оснос С.П., Котлицкая Ю.И. Энергосбережение при применении современных волокнистых огнеупорных и теплоизоляционных материалов и систем отопления в промышленности. [Информационный ресурс]: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=436

8. [Информационный ресурс]: <http://proizvodim.com/osnovnye-napravleniya-razvitiya-proizvodstva-effektivnyh-teploizolyacionnyh-materialov.html>
9. Статистический сборник. «Промышленность Казахстана и его регионов» 2008-2012. Астана, 2013.
[Информационный ресурс]: <http://www.stat.gov.kz>
10. Футеровка термического оборудования.
[Информационный ресурс]: <http://thermal-ceramics.zakupka.com/articles/1101-futirovka-termicheskogo-oborudovaniya/>
11. **Волокнистая теплоизоляция.**
[Информационный ресурс]: <http://www.enresurs.com/art-10.html>
12. Тепловая изоляция. [Информационный ресурс]:
http://evrostroy.biz/useful_info.html.html?cid=2&itemid=3
13. Кривандин В.А., Филимонов Ю.П. Теория. Конструкции и расчеты металлургических печей. Том 1, 1969. - М. - 169 с
14. Воронков С.Т., Исэров Д.З. Тепловая изоляция энергетических установок. - М.: Высш. школа, 1974. - 31 с
15. Шойхет Б.М., Ставрицкая Л.В. Журнал "Энергосбережение". Тепловая изоляция металлических стволов дымовых труб, 2001.
16. Овчаренко Е.Г., Артемьев В. М., Шойхет Б. М., Жолудов В. С. Тепловая изоляция и энергосбережение. [Информационный ресурс]:
http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=202
17. Георгиевский Н.Н. Журнал русского физ.хим.об-ва. XXXV., 1903.
18. Wologdine S. Revue de Metallurgie, 1909. -№ 6. - 46 с.
19. Серебровский А.П. Теория и практика термоизоляции, 1911. - 22 с.
20. Орлов А.А. Холодильные склады, 1912. - 20 с.
21. Лапшин Б.С. Справочник по центральной системе отопления и вентиляции, 1913. - 15 с.
22. Кауфман Б.Н. Теплопроводность строительных материалов. - М., 1995. - 4 с.
23. KammererI. Mitt. Forsch. furWarmeschutzjNL, - 1925. - №4.
24. KammererI. War- meu. KalteschutzinderIndustrie, 1936.
25. Григорьев В.С. Производство и применение минеральной ваты. - Стройиздат, 1947. - 6 с.
26. Жилин А.И., Гаврилов Е. К. Шлаковая вата. Стройиздат, 1946. - 8 с.
27. Лагунов Г.Л. Свойства и технология шлаковых строительных материалов. Промстройиздат, 1949.- 14 с
28. AllcutE. Heating, piping and air cond“. № 5, 1У37; .ling. Journal* N° 1,1937. - 32.
29. Gr if fits E. Heat Insulators, 1929; Thermal conduct, of some industr. materials, 1942. - 35 с.
30. ВоронковС.Т., ИсэровД.З. Обмуровкапарогенераторовтепловыхэлектростанций: учебникдляподгот. рабочихнапроизводстве. - изд. 3-е, перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1995. - 271 с.

31. Троянкин Ю.В., Куликова О.В. Методика расчета теплотерь от наружных поверхностей ограждений тепловых установок. Промышленная энергетика., 2000. -№ 10. - 50-51 с.
32. Строительный вестник. Минеральная вата.
[Информационный ресурс]: <http://sv18.ru/news/minvata>
33. ГОСТ 4640-2011 Вата минеральная. Технические условия
34. ГОСТ 9573-2012 «Плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем теплоизоляционные»
35. ГОСТ 21880-94 «Маты прошивные из минеральной ваты теплоизоляционные»
36. ГОСТ 22950-95 «Плиты минераловатные повышенной жесткости на синтетическом связующем. Технические условия»
37. ГОСТ 21880-2011 «Маты из минеральной ваты прошивные теплоизоляционные. Технические условия»
38. Сравнительные характеристики теплоизоляционных материалов из базальтового волокна.
[Информационный ресурс]: <http://www.teplo-v-dom.net/arhiv/text.php?rubrika=2&text=15&stranica=2>
39. [Информационный ресурс]: <http://www.etnotrade.ru/ognezashhita/supersil/>
40. Бойко Е.А. Котельные установки и парогенераторы., 2005. – 253 с.
41. Любов В.К. Изучение особенностей горения крупных частиц натурального топлива с целью повышения эффективности работы вихревых топок., 1984
42. Влияние коэффициента избытка воздуха на экономичность работы котлоагрегата.
[Информационный ресурс]: <http://auditnorma.ru/vliyanie-koefficienta-izbytkavozduha-na-ekonomichnost-raboty-kotloagregata>
43. Никифоров А.С., Приходько Е.В. Анализ работы футеровок 25-тонных сталеразливочных ковшей. Вестник Павлодарского государственного университета, 2004. - №4. - 14-18 с.
44. Шкляр Ф.Р., Сургучёва Е.Л. Расчёт тепловых потерь реальной кладки. Известия ВУЗов. Чёрная металлургия.,1985. - №2. - 101-103 с.
45. Герасименко И.П. О механизме износа футеровки сталеплавильных Агрегатов. Известия ВУЗов. Чёрная металлургия.,1993. - №8. - 17-18 с.
46. Никифоров А.С. Надежность работы футеровок металлургических печей., 2003.
47. Никифоров А.С., Алькенов А.А. Анализ термонапряженного состояния футеровки печей кальцинации. Цветные металлы.,1974. – 31 с.
48. Приходько Е.В. Тепловая работа высокотемпературных агрегатов., 2009. – 67-74 с.
49. Сасса В.С. Футеровка индукционных плавильных печей и миксеров.,1983.
50. Классификация огнеупоров и теплоизоляционных материалов.
[Информационный ресурс]: <http://aktem.com.ua/refractories/137-klassifikaciya-ogneuporov-i-teploizolyacionnyh-materialov.html>

51. Шведов В.Ф. Теплопроводность низкотемпературной изоляции. Холодильная техника., 2006. - №1.
52. Кришер О. Научные основы техники сушки. - М., 1961.
53. Киселев И.Я. Зависимость теплопроводности современных теплоизоляционных строительных материалов от плотности, диаметра волокон или пор, температуры. Строительные материалы., 2003. - №7. - 17–18 с.
54. А.с.19875 Республика Казахстан. МКИ G01N25/18. Способ определения коэффициента теплопроводности волокнистого материала / Кинжибекова А.К., Приходько Е.В., Никифоров А.С., Никонов Г.Н. Заявл. 08.02.07; Оpubл. 15.08.08. Бюл. № 8.- 3 с

Апробация работы. По материалам работы имеется одна публикация в научном журнале «Вестник» Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева.

Результаты работы докладывались на Международной научной конференции молодых ученых, магистрантов и студентов «XIII Сатпаевские чтения» Павлодарского Государственного университета имени С.Торайгырова.