

На правах рукописи

МАТЮХИНА Анна Владимировна

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
СЫРЬЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Специальность 05.16.07 – Metallургия техногенных и вторичных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Научный руководитель доктор технических наук,
профессор
Кашеев Иван Дмитриевич

Официальные оппоненты: Шешуков Олег Юрьевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГБУН Институт металлургии
Уральского отделения Российской
академии наук, заведующий
лабораторией пирометаллургии
черных металлов

Агеев Никифор Георгиевич,
кандидат технических наук,
профессор, ФГАОУ ВПО «Уральский
федеральный университет имени
первого Президента России
Б.Н.Ельцина», доцент кафедры
металлургии тяжелых цветных
металлов

Ведущая организация Научно-исследовательский институт
металлургической теплотехники –
ОАО «ВНИИМТ»

Защита состоится 14 июня 2013 года в 13⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 004.001.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан ____ мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Дмитриев
Андрей Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При существующих объемах образования металлургических шлаков на территории России в количестве до 90 млн. т твердых отходов в год в целом по отрасли их переработка ограничена получением ценных компонентов для самой металлургической отрасли, сельского хозяйства и дорожного строительства. Производство формованной волокнистой теплоизоляции для строительства из образующихся при производстве металлов шлаковых композиций является наиболее эффективным и экономически целесообразным способом сокращения шлаковых отходов.

Многостадийный процесс производства волокнистых теплоизоляционных материалов, состоящий из стадий высокотемпературного плавления минеральных компонентов с получением подвижного расплава и распыления его с помощью центрифуг, завершается механическим формованием минеральной ваты в виде плоского ковра заданной толщины с введением в его состав жидкого связующего и последующей тепловой обработкой слоя в печах полимеризации. От степени совершенства этих этапов во многом зависят технико-экономические показатели всего процесса производства волокнистых теплоизоляционных материалов.

Поэтому проведенные научные исследования в области разработки новых эффективных технических решений модернизации существующего теплотехнического оборудования минераловатных заводов на основе изучения закономерностей процессов переплава техногенных отходов металлургического производства и природных материалов, тепловой обработки формованных теплоизоляционных материалов является актуальной задачей.

Цель и задачи работы. Целью работы является повышение энергоэффективности основных этапов получения минерального расплава в вагранках, производства волокнистых теплоизоляционных материалов в печах проходного типа на основе исследования особенностей плавления исходных компонентов, формования и тепловой обработки изделий из ваты.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. На основе исследования закономерностей развития тепловой и газодинамической работы минераловатных вагранок разработать энергоэффективную технологию получения подвижного расплава.
2. С использованием особенностей деформации слоя минеральной ваты, слоевой сушки формованных минераловатных изделий, термического отверждения жидкого связующего определить рациональные параметры реализации энергоэффективной и ресурсосберегающей технологии получения формованных минераловатных изделий
3. На основании экспериментальных и расчетных данных разработать конструкцию тепловой камеры, обеспечивающей минимальные энергетические затраты на процесс при ограниченном объеме вредных выбросов в атмосферу.

Научная новизна.

1. Экспериментально показано, что отличительной особенностью тепловой работы минераловатной вагранки является наличие существенной неравномерности температурных полей с ярко выраженным периферийным движением газового потока при превышении теплоемкости потока газов над материалами. При организованном отборе газов из рабочего пространства вагранки закрытого типа в его центральной части выделяется зона повышенной интенсивности теплообмена (центральный ход). При удельном расходе воздушного дутья $80 - 90 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ наблюдается повышенная эффективность получения минерального расплава при минимальном расходе кокса и максимальной производительностью.
2. Разработана методология совершенствования конструкции и выбора оптимальных технологических параметров минераловатной вагранки.
3. Впервые установлено, что формирование структуры минераловатного ковра при механическом уплотнении происходит в основном в первый период путем свободного перемещения волокон. Наиболее упругими свойствами обладает минераловатный слой при ограниченном количестве связки (до 2 - 3 %) или избытке связки (более 10,5 - 11,0 %), определяющей упругость сырых изделий.

4. Определено, что при нагревании минерального ковра с распределенной в нем смеси органического и неорганического связующих упрочнение связки протекает в три периода: первоначального отверждения за счет процесса поликонденсации фенолформальдегидной смолы; умеренного снижения прочности при удалении конденсата и повторного упрочнения слоя органокремниевой связки.

5. Показано, что процесс термического обезвоживания минераловатного ковра происходит в режиме фильтрации газов с образованием зон сушки и переувлажнения. При увеличении температуры теплоносителя до 205-280 °С независимо от плотности минераловатного ковра и скорости фильтрации до 0,62 - 0,65 м/с способствует сокращению необходимого времени тепловой обработки от 35 - 50 до 15 - 20 минут.

Практическая значимость. 1. Показана возможность модернизации существующих минераловатных вагранок при достижении заданной производительности с удельным расходом кокса не выше 140 - 180 кг/т, снижении объема вредных выбросов в атмосферу более чем в два раза и получением расплава требуемого состава и температуры.

2. Определены рациональные параметры механического формования минераловатного ковра с введением до 10,5 - 11,0 % жидкого связующего.

3. Установлены рациональные условия слоевой сушки для получения прочных минераловатных изделий при максимальной скорости фильтрации не более 0,62 - 0,65 м/с и температуре теплоносителя не более 205 - 280 °С.

4. Показано, что при создании сужающего профиля рабочего пространства тепловых камер печи полимеризации при входе теплоносителя и расширяющегося при его выходе улучшается равномерность тепловой обработки изделий при увеличении производительности технологического агрегата до 15 - 25 %.

5. Разработана методика связанных теплотехнических расчетов тепловой камеры и топочного пространства, позволяющая создать основы для

реализации элементов безотходной, малозатратной и гибкой технологии переработки минерального сырья на волокнистую теплоизоляцию.

Достоверность результатов и выводов подтверждается использованием проверенных методов исследований, а также тестированием полученных данных на основе их сравнительного анализа с результатами промышленных испытаний новых технических решений по модернизации минераловатного производства.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследований тепловой и газодинамической работы минераловатных вагранок с открытым и закрытым колошником.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований закономерности развития процесса слоевой сушки при фильтрации теплоносителя и термического упрочнения модифицированной связки.

3. Способы управления физико-химическими процессами, происходящими в структуре минераловатного слоя при его механическом формовании и тепловой обработке.

4. Изменения конструкции камер для тепловой обработки минераловатного ковра.

Реализация работы. Оптимальные значения основных технологических параметров и способы их реализации использованы при разработке и модернизации минераловатных вагранок открытого и закрытого типа ряда отечественных заводов. Рациональная схема газопотоков, измененный профиль рабочего пространства тепловых камер и методика их теплового расчета использованы при разработке проектов реконструкции печей полимеризации технологических линий уральских заводов по производству теплоизоляционных материалов. Состав механической смеси органического и неорганического связующего испытан в промышленных условиях.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на Всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение и нетрадиционные источники энергии» (г. Екатеринбург,

2004 г.); научно-практической конференции ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ» (г.Екатеринбург, 2005 г.); Международной научно-практической конференции «Металлургическая теплотехника: история современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М.А.Глинкова» (г. Москва, МИСиС, 2006 г.); Международной конференции огнеупорщиков и металлургов (Москва, 2007 г.), на VII Всероссийской научно-практической конференции «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья» (г. Белокуриха Алтайского края, 2007 г.), XV и XVI Международных конференциях «Теплотехника и энергетика в металлургии» (г. Днепропетровск, 2008, 2011 г.), Международной научно-практической конференции «Повышение качества образования и научные исследования» в рамках Сатпаевских чтений (Экибастуз, 2008, 2010, 2011 г.), Международном конгрессе по трубе – и печестроению (г. Москва, 2008 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Теория и практика нагревательных печей в XXI веке». Екатеринбург, 2010; научно-технической конференции «Металлургическая теплотехника как основа энерго- и ресурсосбережения в металлургии». Екатеринбург, 2010, научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР», Екатеринбург: УрО РАН, 2011, I-ой международной интерактивной научно – практической конференции «Инновации в материаловедении и металлургии», г.Екатеринбург: УрФУ, 2012, международной научно – практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии», г.Екатеринбург: УрФУ, 2012.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 42 печатных работы, из них 12 в источниках перечня ВАК.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и приложений, изложена на 129 стр. машинописного текста включая 31 таблицы, 41 рисунок. Список использованной литературы включает 145 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении установлена актуальность работы и показано, что наиболее эффективным и экономически целесообразным способом утилизации твердых техногенных металлургических отходов является производство волокнистой теплоизоляции.

В первой главе проведен анализ химического состава и физических свойств твердых отходов металлургического производства, которые представлены в основном сложными системами окисленных химических компонентов. Показано, что наиболее стабильными по составу являются доменные шлаки. Их технологические свойства (вязкость, плотность, поверхностное натяжение, газонасыщенность, температура плавления, поверхностное натяжение, энтальпия в расплавленном состоянии и др.) требуют получение жидкого расплава определенного химического состава и температуры.

Современные тенденции развития техники и технологии производства минераловатных изделий из металлургических шлаков и горных пород показывает, что простота конструкции и обслуживания, высокая удельная производительность (до 100 - 150 т/м² сутки), высокая степень использования тепла (до 60 - 80 % от общего поступления), непрерывность процесса плавки и выпуска расплава, экономичность, незначительные капитальные затраты и др. делают минераловатные вагранки наиболее эффективными для получения подвижного расплава.

Показана роль заключительной стадии получения теплоизоляционных материалов путем формования и тепловой обработки минераловатного ковра. При этом его прочность в сыром состоянии определяется природой и концентрацией связки, состоянием волокон, условиями формования слоя и теплофизическими условиями поликонденсации жидкой связки.

На основе анализа состояния камер тепловой обработки минераловатных изделий различных конструкций выявлены их недостатки и предложены

способы модернизации с целью повышения теплофизических и газодинамических параметров тепловой обработки минераловатного ковра.

Во второй главе на основании экспериментальных данных о конструкции и показателях работы минераловатных вагранок разработана методика оценки их тепловой и газодинамической работы. Установлено, что характерной особенностью эксплуатации минераловатной вагранки любой конструкции является наличие существенной неравномерности температурного и скоростного полей в горизонтальном сечении столба шихты, вызванная распределением воздушного дутья и работой отсасывающего вентилятора (рисунок 1).

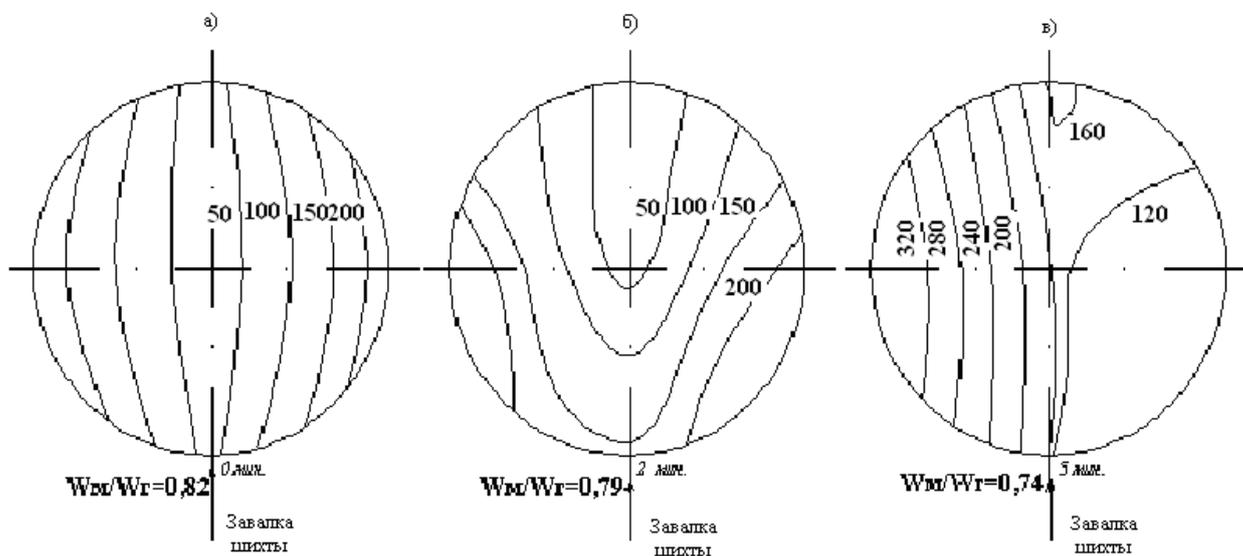


Рисунок 1. Изменение температурного поля слоя шихтовых материалов на уровне засыпи после завалки в минераловатной вагранке с открытым колошником во времени. Цифры у кривых – температура, °С; у графиков – время после завалки, мин.

При этом для всех вертикальных элементов загруженных материалов обеспечиваются условия, когда теплоемкость потока газов, равная произведению их расхода V_r на теплоемкость c_r ($W_r = c_r V_r$), выше теплоемкости потока материалов ($W_m = c_m G_m$), что сопровождается наличие избыточной температуры газов на выходе из слоя по отношению к исходным шихтовым компонентам, а нагреваемые материалы стремятся достичь конечной температуры газов уже на высоте температурного ограничения условий

заметного развития реакции восстановления диоксида углерода (около 750 - 800°C).

В центральной части рабочего пространства печи в направлении от места загрузки располагается зона с пониженной скоростью движения газов и температурой (toterman). Вагранки закрытого типа с организованным удалением, очисткой и дожиганием газообразных продуктов работают с преимущественным развитием процессов горения и теплопередачи в центральной части слоя и вдоль воздушных струй воздуха из фурм.

Анализ обобщенных показателей работы плавильных агрегатов (таблица 1) позволил установить, что при удельном расходе воздуха на получение подвижного расплава в минераловатной вагранке 80 - 90 м³/(м²·мин) обеспечивается его высокая эффективность при интенсивном развитии теплообменных процессов в шахте.

На основании данных математического и физического моделирования газодинамических процессов в слое установлены рациональные значения высова фурм в рабочее пространство 0,3 - 0,35 его радиуса, величины пережима в районе верха горна равного 0,85 радиуса печи, угла наклона фурм к горизонту 17 - 25° и при расстоянии между фурмами не более 0,6 м, при квадратной – не более 0,5 м.

Разработана методика выбора рациональных параметров получения минерального расплава, включающая анализ состояния и особенностей развития ее тепловой и газодинамической работы, идентификацию условий теплогенерации, особенностей движения газов и теплообмена в рабочем пространстве, установление определяющих факторов, оценку методов и степени их воздействия на технологический процесс. На примере использования ее в условиях промышленной переработки минерального сырья на волокнистую теплоизоляцию ряда предприятий созданы технологические основы для реализации элементов безотходной, малозатратной и гибкой технологии.

Таблица 1.

Характеристики тепловой и газодинамической работы минераловатных вагранок после реконструкции

| Вид переплавляемого материала, место установки | Средний расход кокса, кг/т | Удельный расход воздуха, м ³ /(м ² мин) | Давление дутья, кПа | Доля площади фурм от площади рабочего пространства | Средняя температура на уровне засыпи, °С | $\frac{W_m}{W_z}$, доли ед. | Средняя скорость изменения температуры на уровне засыпи, град./мин | Окружная неравномерность, % | Радиальная неравномерность, % | Средняя производительность по расплаву, т/(ч·м ²) | Максимальная температура расплава |
|--|----------------------------|---|---------------------|--|--|------------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------|---|-----------------------------------|
| Шлак +минеральное сырье, БЗТИМ | 257 | 17,89 | 4,0 | 0,213 | 89,6 | 0,881 | 19,94 | 270,1 | 186,4 | 1,71 | 1370 |
| Шлак +минеральное сырье, КЗТИМ | 241 | 39,52 | 4,2 | 0,180 | 123 | 0,836 | 41,38 | 62,03 | 46,05 | 1,94 | 1407 |
| Шлак +минеральное сырье, г. Сатка, 2000г. | 270 | 75,29 | 4,5 | 0,120 | 137 | 0,817 | 20,3 | 65,89 | 83,86 | 2,16 | 1375 |
| Шлак +минеральное сырье, г. Сатка, 2009г. | 243,5 | 113,97 | 4,5 | 0,042 | 99,8 | 0,867 | 22,0 | 179,3 | 105,8 | 1,96 | 1380 |
| Габбро, «Эковер» ОАО «Ураласбест» | 140 | 49,75 | 8,1 | 0,035 | 122 | 0,84 | 21,2 | 25,6 | 19,3 | 3,73 | 1580 |
| Базальт, «Изба» г.Богданович | 270 | 33,43 | 6,7 | 0,063 | 209 | 0,72 | 23,3 | 27,94 | 16,35 | 2,20 | 1480 |

Использование в шихте добавок природных кремнийсодержащих компонентов способствует повышению вязкости конечного расплава за счет преимущественного развития процессов плавления в зонах с интенсивным развитием процессов теплообмена.

Замена до 30 % кокса углем сопровождается снижением температуры перегрева расплава примерно на 50 градусов и производительности на 25 - 30 % и экономически оправдана при реализации только пониженной производительности вагранки.

Использование низкого разрежения на колошнике при работе вагранки закрытого типа в интервале 0,6 - 0,65 Па способствует получению максимального уровня перегрева расплава при наибольшей жидкоподвижности и ограниченном изменении производительность агрегата.

Уменьшение крупности фракции кокса сопровождается повышением производительности агрегата, температуры перегрева расплава, содержания СО в отходящих газах, температуры подогрева воздушного дутья, температуры отходящих газов за счет более эффективной организации основных процессов в слое.

В третьей главе приведены экспериментальные данные о развитии физико-химических процессов при получении прочных минераловатных изделий в присутствии жидкого связующего при температурах не выше 250 - 300°С.

Показано, что под действием постоянной нагрузки на первоначальном этапе деформации минераловатного слоя происходит сжатие и свободное перемещение волокон в пространстве друг относительно друга (рисунок 2).

После достижения некоторой его плотности, когда между волокнами формируется наибольший контакт, начинается процесс взаимного перемещения группы волокон осложненных действием сил межволоконного трения.

Образованный таким образом минераловатный слой способен обладать как упругой, так и остаточной пластичной деформацией, остающейся после снятия внешней нагрузки.



Рисунок 2. Кинетика усадки слоя минеральной ваты под 6,7 кПа

Дальнейшая деформация минераловатного слоя происходит за счет нагружения отдельных волокон (второй период деформации). При наличии в слое раствора связующего возникают условия для соединения отдельных элементов между собой за счет сил поверхностного натяжения в присутствии адсорбционного эффекта.

Наилучшие эластические свойства сырых минераловатных изделий и наименьшие энергетические затраты наблюдаются при содержании в них 10,5 – 11,0 % связки. При более высоком содержании связующего увеличивается упругость слоя за счет действия вязкостных сил композиции минеральной основы и жидкой связки.

Установлено, что при фильтрации теплоносителя через влажный слой обеспечивается удаление избыточной влаги из него с формированием зоны сушки, которая перемещается в направлении движения газового потока в виде активной области (рисунок 3). При охлаждении отходящих газов в слое до температуры точки росы происходит конденсация влаги и формирование зоны переувлажнения, которая на каждом горизонте слоя последовательно перемещается в сторону сырой части. С увеличением плотности обрабатываемых изделий скорость перемещения зоны переувлажнения возрастает, а ее значения в более чем в 5 раз превосходят скорости перемещения зоны сушки.

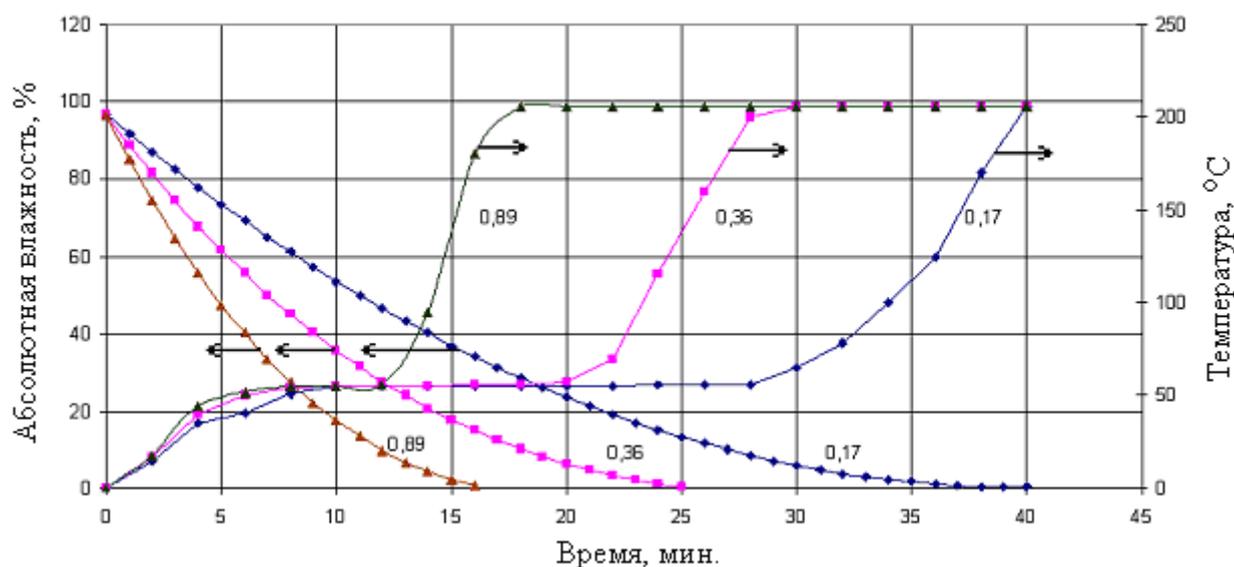


Рисунок 3. Зависимость изменения абсолютной влажности образцов плиты ППЖ-200 и температуры отходящих газов от скорости фильтрации газов (цифры у кривых, м/с) во времени

Используя экспериментальные данные по сушке минераловатных изделий, определены основные ее параметры (общее время, средняя скорость, интенсивность влагоудаления, коэффициент влагообмена) в зависимости от температуры теплоносителя (t) и скорости его фильтрации (W) (таблица 2).

Установлено, что при скоростях фильтрации газов 0,6 - 0,65 м/с обеспечивается минимально необходимая продолжительность нагрева изделий независимо от их плотности. Повышение температуры теплоносителя при нагреве материалов до 205 - 280 °C обеспечивает увеличение скорости их обезвоживания. Дальнейшее повышение температуры газов снижает среднюю скорость удаления влаги за счет интенсификации условий формирования зоны переувлажнения.

Экспериментально показано, что процесс теплового упрочнения органической связки протекает в три периода (рисунок 4). В первый период нагрева связки происходит отверждение связующего и увеличение его прочности за счет поликонденсации фенолформальдегидной смолы. Изотермическая выдержка при повышенной температуре не влияет на изменение прочности и остается на уровне 70 кПа. Примерно через 70 с

происходит процесс повторного упрочнения слоя связующего, достигающего максимального значения 85 кПа через 100 с.

Таблица 2

Изменение характеристик процесса сушки минераловатных изделий

| | |
|--|---|
| Общее время влагоудаления, мин. | <p>плотностью 75 кг/м³</p> $\tau_{\text{общ.}} = 8,28 + 0,35 \cdot t - 58,69 \cdot W - 0,0008 \cdot t^2 - 0,1292 \cdot t \cdot W + 65,74 \cdot W^2$ <p>плотностью 200 кг/м³</p> $\tau_{\text{общ.}} = 76,84 + 0,0054 \cdot t - 154,22 \cdot W - 0,0003 \cdot t^2 - 0,0484 \cdot t \cdot W + 110,94 \cdot W^2$ |
| Средняя скорость влагоудаления, %/мин | <p>плотностью 75 кг/м³</p> $V_{\text{уд.}} = -10,72 + 0,13 \cdot t - 5,78 \cdot W - 0,0003 \cdot t^2 - 0,0357 \cdot t \cdot W - 1,386 \cdot W^2$ <p>плотностью 200 кг/м³</p> $V_{\text{уд.}} = -30,31 + 0,236 \cdot t + 11,48 \cdot W - 0,0004 \cdot t^2 + 0,0033 \cdot t \cdot W - 5,664 \cdot W^2$ |
| Интенсивность влагоудаления, кг/м ² ч | <p>плотностью 75 кг/м³</p> $m = 0,0159 - 9,753 \cdot 10^{-5} \cdot t - 0,0111 \cdot W + 1,753 \cdot 10^{-7} t^2 + 3,935 \cdot 10^{-5} t \cdot W + 0,0023 W^2$ <p>плотностью 200 кг/м³</p> $m = -0,0061 + 4,965 \cdot 10^{-5} \cdot t - 0,0086 \cdot W - 8 \cdot 10^{-8} t^2 + 3,372 \cdot 10^{-5} t \cdot W - 0,0104 W^2$ |
| Коэффициент влагообмена, кг/м ² ч·кПа | <p>плотностью 75 кг/м³</p> $\beta = 0,0604 - 0,0004 \cdot t - 0,0046 \cdot W + 7,159 \cdot 10^{-7} t^2 + 1,6494 \cdot 10^{-5} t \cdot W + 0,001 W^2$ <p>плотностью 200 кг/м³</p> $\beta = 0,062 - 0,0005 \cdot t - 0,0329 \cdot W + 8,336 \cdot 10^{-7} t^2 - 7,536 \cdot 10^{-5} t \cdot W - 0,0078 W^2$ |

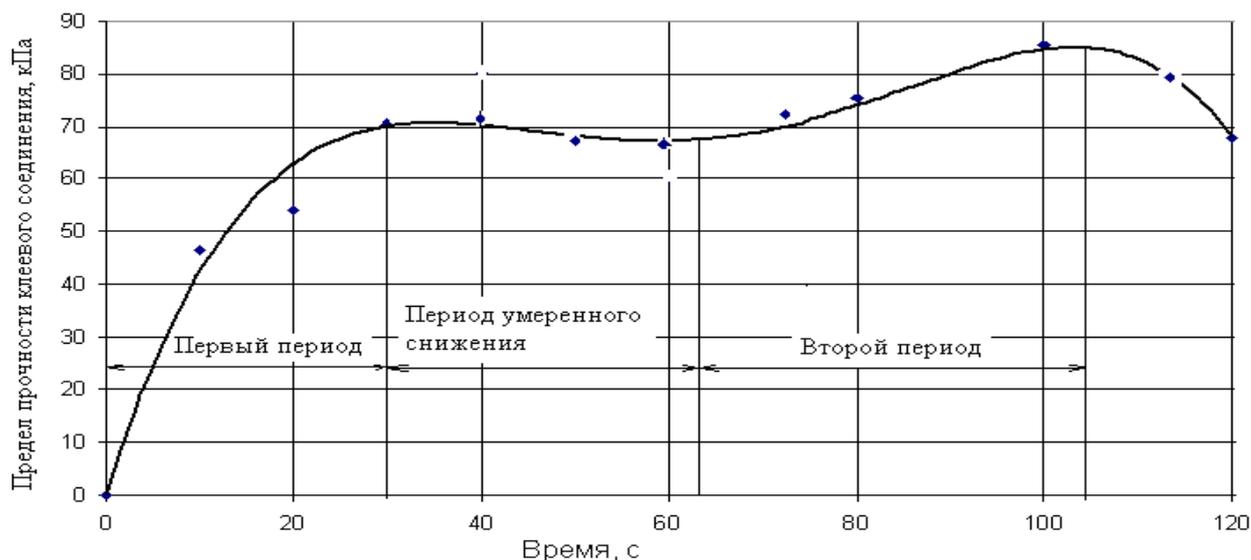


Рисунок 4. Изменение предела прочности клеевого слоя на основе смеси фенолформальдегидной смолы и жидкого стекла от времени изотермической выдержки при температуре 138°C

Используя экспериментальные данные по изменению предела прочности клеевого слоя механической смеси органического и неорганического связующих при варьировании плотности раствора жидкого стекла ($\rho_{жс}$), соотношения масс растворов органического и неорганического связующих (О/Н) и температуры изотермической выдержки при тепловой обработке (t), получены обобщенные уравнения, описывающие изменение основных характеристик: максимума прочности связки в первый период Pr_1 , длительности первого периода τ_1 , изменение прочности в период умеренного упрочнения ΔPr , длительности умеренного упрочнения τ_{Δ} , максимума прочности связки во второй период Pr_2 (таблица 3).

Таблица 3

Характеристики кинетики упрочнения клеевой композиции

| | |
|---|---|
| Величина первого максимума прочности связки Pr_1 , Па | $Pr_1 = 1,887 \cdot 10^5 + 3,559 \cdot 10^5 \cdot \rho_{жс} - 921,537 \cdot O/H - 1,603 \cdot 10^5 \cdot \rho_{жс}^2 +$ $+ 740,705 \cdot \rho_{жс} \cdot O/H + 0,141(O/H)^2$ $Pr_1 = 3939,378 - 27,663 \cdot (O/H) + 151,176 \cdot t - 0,445 \cdot (O/H)^2 + 0,199 \cdot (O/H) \cdot t -$ $- 0,488 \cdot t^2$ |
| Время первого периода упрочнения, мин. | $\tau_1 = 3049,131 + 5516,523 \cdot \rho_{жс} - 6,735 \cdot (O/H) - 2453,743 \cdot \rho_{жс}^2 + 6,297 \cdot \rho_{жс} \cdot (O/H) -$ $- 0,007(O/H)^2$ $\tau_1 = 72,555 + 1,645 \cdot (O/H) + 1,545 \cdot t - 0,014 \cdot (O/H)^2 - 0,002 \cdot (O/H) \cdot t -$ $- 0,006 \cdot t^2$ |
| Изменение прочности в период умеренного упрочнения, Па | $\Delta Pr = 2,682 \cdot 10^6 - 452,193 \cdot \rho_{жс} - 1092,143 \cdot O/H + 1,8782 \cdot \rho_{жс}^2 + 9,83 \cdot \rho_{жс} \cdot O/H +$ $+ 0,9(O/H)^2$ $\Delta Pr = 8176,064 - 178,278 \cdot (O/H) - 86,143 \cdot t - 0,42 \cdot (O/H)^2 + 1,263 \cdot (O/H) \cdot t +$ $+ 0,174 \cdot t^2$ |
| Изменение продолжительности и периода умеренного упрочнения, мин. | $\tau_{\Delta} = 5855,709 + 10744,716 \cdot \rho_{жс} - 12,51 \cdot (O/H) - 4826,708 \cdot \rho_{жс}^2 +$ $+ 9,894 \cdot \rho_{жс} \cdot (O/H) - 0,007(O/H)^2$ $\tau_{\Delta} = 112,052 + 1,589 \cdot (O/H) + 2,403 \cdot t - 0,003 \cdot (O/H)^2 - 0,01 \cdot (O/H) \cdot t -$ $- 0,007 \cdot t^2$ |
| Изменение конечной максимальной прочности, Па | $Pr_2 = 9,038 \cdot 10^5 - 1,554 \cdot 10^6 \cdot \rho_{жс} - 260,957 \cdot O/H + 6,674 \cdot 10^5 \cdot \rho_{жс}^2 +$ $+ 241,992 \cdot \rho_{жс} \cdot O/H - 0,368(O/H)^2$ $Pr_2 = 891,761 - 79 \cdot (O/H) + 59,498 \cdot t + 0,193 \cdot (O/H)^2 + 0,115 \cdot (O/H) \cdot t -$ $- 0,255 \cdot t^2$ |

Исходя из особенностей развития кинетики упрочнения связующего, было установлено, что:

– для получения максимальной прочности связки процесс ее термической обработки следует завершать в течение первого периода (1 – 1,5 мин.). Дальнейший ее нагрев приводит к разупрочнению образующегося слоя вследствие удаления избыточной влаги, образовавшейся при конденсации связующего;

– температуру тепловой обработки следует ограничивать 160 – 170 °С, при которой завершаются в основном процессы поликонденсации связующих компонентов.

Промышленные испытания при введении жидкого стекла в раствор органического связующего в количестве 0,42 % от его массы показали возможность снижения общего расхода фенолформальдегидной смолы на 22,25 % и уменьшения необходимого количества минеральной части слоя на 13,46 % при сохранении прочностных свойств готовых изделий на уровне 100 – 110 кПа.

В четвертой главе на основании анализа тепловой и газодинамической работы печей полимеризации различных конструкций, установлены основные их недостатки и разработаны направления модернизации.

Наиболее эффективные нагрев минераловатных изделий достигается при перекрестной схеме движения газов и материалов. Показано, что чем выше кратность циркуляции газов в рабочем пространстве, тем меньше тепловые потери и выше КПД тепловой камеры. При входе в рабочее пространство и на его выходе всегда присутствует зона с пониженной температурой (рисунок 5.). При этом по ширине слоя наблюдается неравномерность распределения температурного поля, достигающая до 70 град/м. В наилучших температурных условиях находится часть изделий, со стороны которой осуществляется подача теплоносителя в рабочее пространство.

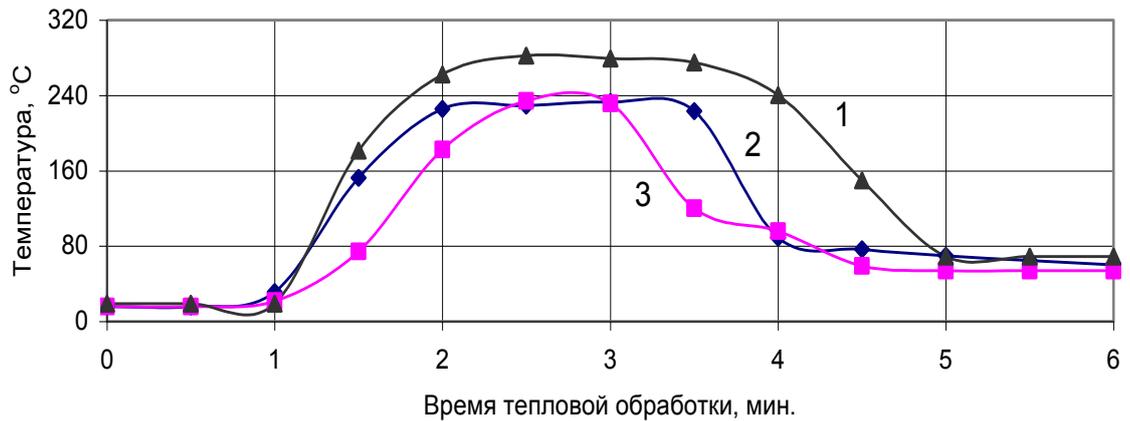


Рисунок 5. Изменение температурного поля на верхней поверхности минераловатного слоя по ходу движения конвейера. Цифры у кривых – температура материала:

1 – с левого края; 2 – середина слоя; 3 – с правого края

Принимая, что минераловатный ковер имеет одинаковое сопротивление, как по ширине, так и по высоте слоя при сечении распределительного канала в виде горизонтального параллелепипеда высотой (a_n), шириной (b) с шириной продольной щели (δ) при подаче теплоносителя расходом (Q) со скоростью (W_n), уравнение Бернулли с учетом $\frac{dW}{dx} = W'_x = \delta W_x / F$ в дифференциальной форме имеет вид

$$W_x'' W_x' + \frac{\mu^2 \delta^2 W_x' W_x}{F^2} - \frac{\mu^2 \delta^2 \lambda W_x^2}{2F^2 d_3} = 0, \quad (1)$$

а с учетом безразмерных величин $\bar{x} = x/L$; $\bar{W}_x' = W_n W_x' / L$; $\bar{W}_x'' = W_n \cdot W_x'' / L$.

$$\bar{W}_x'' \cdot \bar{W}_x' + p \bar{W}_x' \cdot \bar{W}_x + q \bar{W}_x^2 \lambda \cdot \bar{L} = 0 \quad (2)$$

где $p = \mu^2 \bar{f}^2$; $q = -0,5 \mu^2 \bar{f}^2$; $\bar{f} = f/F = \frac{\delta L}{F}$; $\bar{L} = \frac{L}{d_3}$.

Анализ результатов расчетов относительных отклонений скоростей истечения газа из газораспределителя постоянного сечения во входном и выходном сечении с учетом параметров щели $\mu \bar{f} = 0,5 - 2,5$ газораспределителя $\lambda \bar{L} = 0,1 - 0,2$ показал, что нагреваемый слой минераловатных изделий в потоке теплоносителя, подаваемого через боковую сторону в камере прямоугольного сечения, будет иметь существенно отличные условия движения газов. Для выравнивания температуры нагрева

минераловатных изделий в тепловой камере следует использовать газораспределитель переменного сечения с подачей теплоносителя в слой через щель постоянной ширины, ограниченной наклонной поверхностью, образующей с боковыми поверхностями клин. Используемый профиль направляющей плиты газораспределителя будет представлять собой наклонную прямую плоскость.

Для снижения неравномерности тепловой обработки минераловатного слоя по его ширине в верхней части камеры от ввода основного потока следует установить наклонную пластину, соединяющую верх рабочего пространства с ее нижней частью на выходе из камеры, а в поперечном сечении камеры - наклонную пластину, соединяющую боковую сторону ввода теплоносителя с нижней образующей противоположной стороны камеры. В нижней части камеры следует выполнить зеркальное изменение сечения рабочего пространства (рисунок 6).

В этом случае степень неравномерности температурного поля минераловатного ковра, оцениваемая по относительному изменению средней температуры по горизонтам к среднему ее значению по всему сечению, изменяется после реконструкции от 122 до 5 - 7 %, что позволило увеличить производительность всей технологической линии на 5 - 6 % и снизить количества брака изделий на 1 - 2 %.

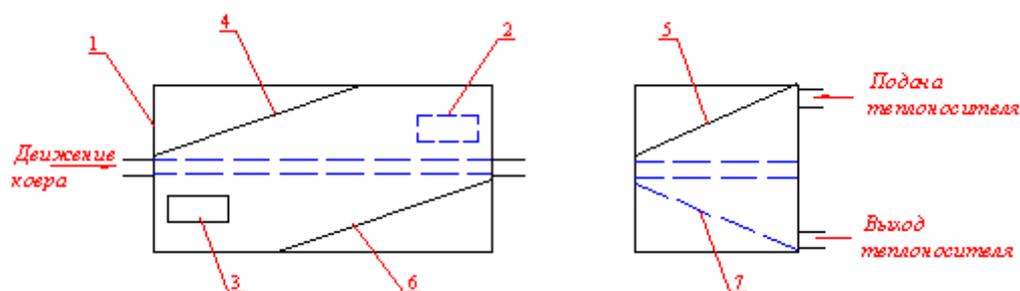


Рисунок 6. Схема реконструкции внутренней части тепловой камеры: 1 – тепловая камера; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 - продольная пластина верхней части камеры; 5 - поперечная пластина верхней части камеры; 6 – продольная пластина нижней части камеры; 7 – поперечная пластина нижней части камеры

Используя циркуляционную схему движения теплоносителя с его реверсом по тепловым камерам и отбором излишков газа через отдельные входные и

выходные тамбуры, разработана рациональная конструкция тепловой камеры (рисунок 7).

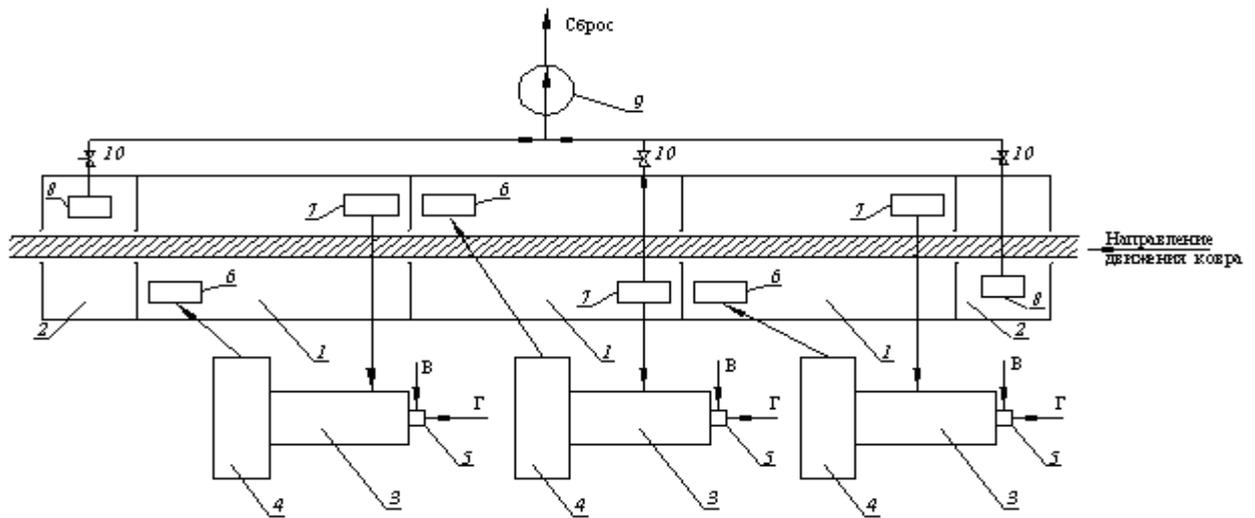


Рисунок 7. Рациональная схема газопотоков в трехкамерной печи полимеризации волокнистых материалов: 1 – тепловая камера; 2 – отделительные тамбуры; 3 – топка; 4 – циркуляционный вентилятор; 5 – горелка; 6 – патрубок подвода теплоносителя; 7 – патрубок отвода циркулянта; 8 – сброс избыточного газа; 9 – сбросной вентилятор; 10 – регулировочный шибер

Системный подход к анализу процессов производства формованных минераловатных изделий разработана методика связанного расчета печи полимеризации. Расчет теплового баланса рабочего пространства тепловой камеры позволяет установить температуру удаляемых газов на рециркуляцию. По данным теплового баланса отдельной топки определяют общий расход топлива на отопление тепловой камеры. При расчете многокамерных тепловых агрегатов необходимо учитывать изменение теплосодержания слоя и поддерживающих его металлических транспортеров на предыдущих стадиях нагрева.

На основании экспериментальных данных и разработанной методики установлено, что при использовании циркуляционной печи общий расход топлива на тепловую обработку минераловатного слоя примерно в 10,5 раз меньше, чем при прямоточной схеме (таблица 4).

При этом изменение количества тепловых камер способствует увеличению общего расхода топлива только на компенсацию тепловых потерь.

Сравнительные расчетные показатели работы печей полимеризации

| Показатель | Вид печи полимеризации | | | |
|--|------------------------|---------------|--------------|--------------|
| | Прямоточная | Противоточная | | |
| | | Однокамерная | Двухкамерная | Трехкамерная |
| Общий расход топлива, кг усл.т/ч | 655 | 54,07 | 59,30 | 62,50 |
| Общий массовый поток на печи, кг/ч | 69400 | 23371 | 46742 | 70113 |
| Количество сбрасываемых газов, м ³ /ч | 89338 | 1331,63 | 1480,94 | 1573,97 |
| Общий тепловой КПД агрегата, % | 5,32 | 47,55 | 45,67 | 44,74 |
| Удельный расход тепла, мДж/м ³ | 1467 | 151,45 | 166,09 | 175 |

Сравнительный анализ полученных данных показывает, что в циркуляционной печи общий расход тепла примерно в 8,4 раза меньше чем в прямоточной, а ее тепловой КПД в 8,41 раза больше. Общие массовые потоки, движущиеся в циркуляционной и прямоточной печах примерно одинаковы, а количество сбрасываемых газов на станцию нейтрализации примерно в 57 раз меньше, что снижает экологическую нагрузку на окружающую среду. Удельный расход тепла на получение 1 м³ минераловатных изделий в циркуляционной печи оказывается ниже в 8,38 раза, чем с прямоточной. При этом минимальный расход тепла будет наблюдаться на однокамерной печи и составлять 151,45 мДж/м³ изделий.

Таким образом, наиболее экономичным вариантом реализации печи полимеризации является однокамерная печь. Большое количество камер следует использовать только с целью увеличения производительности технологической линии и определяется условиями обезвоживания минераловатного слоя.

Разработанная методика расчета и проектирования технологических агрегатов подобного типа была использована при разработке технических заданий на реконструкцию печей полимеризации ОАО «Нижнетагильский

завод теплоизоляционных материалов» и ОАО «Красноярский завод теплоизоляционных материалов». Исходные данные, подготовленные для выполненного и реализованного проекта изготовления двухкамерной печи полимеризации для производства плиты средней плотности ($75 - 125 \text{ кг/м}^3$) на ОАО «Билимбаевский завод термоизоляционных материалов», полностью совпали с результатами промышленных испытаний.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Отличительной особенностью тепловой работы минераловатной вагранки с открытым колошником является наличие существенной неравномерности температурных полей с ярко выраженным периферийным движением газового потока при превышении теплоемкости потока газов над материалами. При организованном отборе газов из рабочего пространства плавильного шахтного агрегата в его центральной части выделяется зона повышенной интенсивности теплообмена (центральный ход). При удельном расходе воздушного дутья $80 - 90 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ наблюдается повышенная эффективность получения минерального расплава.

2. Разработана методология совершенствования конструкции и выбора параметров минераловатной вагранки, обеспечивающих реализацию энерго-и ресурсосберегающую технологию получения подвижного расплава.

3. Процесс формирования структуры сырого минераловатного ковра под действием прижимных валков осуществляется в два этапа: свободного перемещения отдельных волокон друг относительно друга и деформацией их плотного слоя. Наиболее упругими свойствами обладает минераловатный слой при содержании связки (до $2 - 3 \%$) и при избытке связки (более $10,5 - 11,0 \%$).

4. При тепловой обработке слоя минераловатных изделий с использованием перекрестной схеме движения газов и материалов происходит формирование зон сушки и переувлажнения. Наибольшая скорость удаления влаги из слоя достигается при температуре теплоносителя $205 - 280 \text{ }^\circ\text{C}$ и скоростях фильтрации $0,62 - 0,65 \text{ м/с}$.

5. Тепловое упрочнение комплексного связующего на основе растворов фенолформальдегидной смолы и жидкого стекла в течение первых 1,0 – 1,5 минуты обеспечивает прочностные свойства волокнистых изделий за счет образования новой твердой фазы с последующим разупрочнением связки в результате действия влаги, образующейся при поликонденсации связующего.

6. Оптимальными условиями получения минераловатных изделий заданной прочности является использование фенолформальдегидной смолы и добавки жидкого стекла.

7. Использование циркуляционной схемы движения теплоносителя тепловая обработка волокнистых материалов снижает расход топлива в 10,5 раза, повышает тепловой КПД агрегата в 8,41 раза, уменьшает в 56,76 раза количество сбрасываемых газов при пониженных энергозатратах на их транспортирование.

Основное содержание диссертационной работы представлено в следующих публикациях:

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК

1. Матюхина А.В. Снижение материальных и тепловых потерь при производстве минерального расплава/ Матюхина А.В., Берсенев И.С. // «Новые огнеупоры». 2007. №3. С.12 - 14.

2. Матюхина А.В. Особенности формирования слоя минеральной ваты / Матюхина А.В., Кащеев И.Д., Матюхин В.И. // «Огнеупоры и техническая керамика». 2009. №4-5. С. 74 - 79.

3. Матюхина А.В. Выбор и обоснование конструкции печи для тепловой обработки формованных волокнистых изделий/ Матюхина А.В., Кащеев И.Д., Матюхин В.И. // Новые огнеупоры. 2009. №3. С. 48 - 55.

4. Матюхина А.В. Особенности тепловой работы многокамерной печи полимеризации минераловатных изделий/ Матюхина А.В., Кащеев И.Д., Матюхин В.И., Кох Э.Г. // Известия вузов.Черная металлургия. 2010. №2. С. 40-44.

5. Матюхина А.В. Исследование особенностей слоевой сушки минераловатных изделий/ Матюхина А.В., Кащеев И.Д., Матюхин В.И., Трапезникова Е.В. // Известия вузов. Черная металлургия. 2010. №4. С. 50 - 53.

6. Матюхина А.В. Энергоэффективная технология производства формованных минераловатных изделий/ Матюхина А.В., Кащеев И.Д., Матюхин В.И Кийк А.А. // Строительные материалы. 2010. №11. С. 73 - 75.

7. Матюхина А.В. Обоснование изменений конструкции тепловой камеры печи полимеризации для тепловой обработки формованных волокнистых изделий/ Матюхина А.В., Кащеев И.Д., Матюхин В.И // Известия вузов. Черная металлургия. 2011. №2. С. 42 - 46.

Доклады в сборниках научных трудов конференций

1. Матюхина А.В. Совершенствование конструкций минераловатных вагранок / Матюхина А.В., Матюхин В.И., Ярошенко Ю.Г., Лобанов В.И. // III-я Международная научно-практическая конференция: «Металлургическая теплотехника: история современного состояния, будущее. К столетию со дня рождения М.А. Глинкова»: сб.тр. - М.: МИСиС. 2006. С. 429-433.

2. Матюхина А.В. Разработка ресурсосберегающей технологии ваграночной плавки минерального сырья/ Матюхина А.В., Матюхин В.И., Кащеев И.Д., [и др.] // III Международный конгресс «Пече – трубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология»: сб. тр. - М.: МИСиС, 2008. С. 204-212.

3. Матюхина А.В. Создание энергоэффективного теплового оборудования для производства минераловатных изделий / Матюхина А.В., Матюхин В.И., Кийк А.А. // Международная научно-техническая конференция «Металлургическая теплотехника как основа энерго- и ресурсосбережения в металлургии»: сб.тр. - Екатеринбург: ОАО «ВНИИМТ», 2010. С. 303-310.

Бумага писчая
Усл. изд. л. 2,4

Формат 60 x 84 1/16
Усл. печ. л. 1,34
Заказ

Плоская печать
Тираж 100

Ризография НИИ УрФУ