

На правах рукописи

ЛИТВИНОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
И АППАРАТОВ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ БАЗАЛЬТОВОЛОКНИСТЫХ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СОЗДАНИЯ
И ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
ОПЫТНО - ПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКИ**

Специальность 05.17.08

"Процессы и аппараты химических технологий"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2003

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии "Федеральный научно-производственный центр "Алтай"

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор **Потапов М.Г.**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор **Волокитин Г.Г.**

доктор химических наук,
профессор **Белоусов А.М.**

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие
"Московский институт теплотехники" (г. Москва)

Защита состоится «23» декабря 2003 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.08 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «21» ноября 2003 г.

диссертационного совета, к.т.н.



Петровская Т.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из важнейших средств энергосбережения в мире признано совершенствование теплоизоляции зданий, сооружений, промышленного оборудования, тепловых сетей и др.

Ассортимент применяемых в настоящее время утеплителей достаточно широк: от пенопластов до минераловатных композиций на полимерных и неорганических связующих. Особая роль в нем отводится материалам из нерудных горных пород. Полученные из них базальтоволокнистые материалы (БВМ) обладают высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами, повышенной температуростойкостью, виброустойчивостью и долговечностью.

До настоящего времени эти новейшие и перспективные материалы остаются не в полной мере востребованными отчасти из-за отсутствия нормативной документации, ремонтных и строительных технологий их применения и малых объемов существующих производств, в то время как тенденция экспорта в Россию устаревших технологий и оборудования для производств по переработке минерального сырья в БВМ растет.

В России имеется более 70 предприятий и цехов по выпуску волокнистых теплоизоляционных материалов. К сожалению, номенклатура многих отечественных утеплителей расширяется медленно.

В сложившейся обстановке создание новых высокоэффективных экологически безопасных БВМ, разработка автоматизированных технологических процессов и организация производств в различных регионах страны представляется актуальной задачей.

Проводимые в ФГУП "ФНПЦ "Алтай" разработки позволяют решать ее.

Цель и задачи диссертационной работы состоит в с разработке автоматизированного непрерывного технологического процесса получения теплоизоляционных базальтоволокнистых материалов, основанного на индукционном методе плавления сырья и воздушно-дутьевом способе раздува расплава; совершенствованию процессов и аппаратов технологии их производства. Созданная в рамках настоящей диссертационной работы модельная экспериментальная установка послужила реальным объектом для проведения комплекса экспериментально - исследовательских работ.

Программа этих работ включает следующие задачи:

- разработку аппаратурно-технологической схемы опытно-промышленной установки по выпуску БВМ;
 - отработку технологических режимов плавления и аппаратов под заданный вид сырья, требуемую производительность и качество продукции;
 - реализацию управления фазой плавления под заданную производительность на основе математического моделирования;
- создание методологии исследования горных пород на пригодность их для

- производства волокон с параметрами, удовлетворяющими требованиям нормативной документации;
- изучение механизма волокнообразования с помощью дутьевых акустических устройств, выбор их оптимальной конструкции и способов настройки;
- разработку комплекса оборудования и отработку технологических режимов при изготовлении теплоизоляционных плит;
- разработку автоматизированной системы управления технологическим процессом;
- анализ пригодности созданной установки к тиражированию в различных регионах страны.

Объект, предмет и методы исследования. Объектом исследования в настоящей работе является технологический процесс производства БВМ, основанный на индукционном методе плавления сырья и воздушно-дутьевом способе раздува расплава. Предметом исследования служит разработка новых и совершенствование известных процессов и аппаратов технологии производства теплоизоляционных базальтоволоконистых материалов.

Несмотря на кажущуюся простоту аппаратурно-технологической схемы, разработка промышленной технологии производства БВМ из минерального сырья требует детального изучения всех процессов, положенных в ее основу, начиная с методов исследования исходного сырья и математического моделирования фазы процесса плавления. Потребовались также разработка новых конструкций отдельных узлов оборудования и автоматизация управления всем технологическим процессом для обеспечения заданной производительности и качества выпускаемой продукции.

Научная новизна.

- Впервые определены и сформулированы основные закономерности индукционного плавления минерального сырья, связывающие температуру расплава, и, соответственно вязкость, с дозированием шихты и изменением характеристик нагрузочного контура высокочастотного (ВЧ) генератора.
- С использованием полученных закономерностей разработана физико-математическая модель процесса индукционного плавления шихты, позволяющая с целью снижения энергозатрат при заданном качестве волокон, оптимизировать параметры процесса плавления.
- На основе разработанной физико-математической модели впервые предложен алгоритм автоматического управления процессом получения расплавов горных пород, учитывающий область оптимальных режимов плавления по критерию минимальных энергозатрат на единицу расхода шихты и зависимость частоты ВЧ генератора от количества дозируемого сырья. Применение алгоритма позволяет повысить производительность на 20 % при заданной мощности системы ВЧ нагрева.

- Предложена новая методология определения пригодности горных пород для получения супертонких волокон индукционным способом плавления, базирующаяся на определении химического состава горных пород и последующем проведении комплекса экспериментальных исследований изменения вязкости расплавов пород в заданных температурных диапазонах.
- Показано, что наиболее оптимальным является процесс индукционной плавки пород в «холодном тигле» является процесс, происходящий при закрытом зеркале расплава.
- Установлено, что для повышения производительности раздувочной головки при заданном качестве получаемых волокон необходимо использовать раздув с истечением потока, резонирующего в определенном сверхзвуковом диапазоне.

Практическая значимость и реализация работы. Все научные положения работы реализованы при создании опытно-промышленной установки и отработке технологических режимов производства теплоизоляционных материалов. Обоснованность научных положений и рекомендаций и их достоверность доказывает стабильность показателей работы установки по выпуску сертифицированной продукции в течение двух лет. Продукция удостоена диплома "Лучший Алтайский товар 2001 г."

По разработанной технологии в 1995–1996 гг. в ООО "Спецжелезобетон" (пос. Горный Новосибирской области) была спроектирована, смонтирована и запущена в эксплуатацию установка по выпуску базальтовой ваты и плит (марки М-75 на синтетическом связующем) мощностью 300 т/год.

В 1999–2001 гг. в ООО "Черниговский базальт" (г. Кемерово) сданы в эксплуатацию технологические линии по выпуску базальтоволоконистых материалов различного назначения общей мощностью 750 т/год.

В 2000 г. на территории Новосибирской ТЭЦ-5 (ООО "Новосибирскэнерго") впервые в РФ было создано производство по выпуску минеральной ваты из двух модулей общей мощностью 800 т/год. Аналогичные модули отсутствуют и за рубежом.

В настоящее время ведутся монтажные работы по созданию аналогичных производств БВМ в Гусиноозерске (Республика Бурятия), г. Березняки (Пермская область) мощностью 800 т/год каждая.

В ходе исследований Барнаульского завода асбестотехнических изделий по замене асбеста минеральной ватой в тормозных колодках (деталь № 64 226-350 1105, выпускаемая по ТУ 2571-003-05759706-2001), поставляемых на Минский автомобильный завод, было отмечено, что выпускаемая на опытно-промышленной установке ФГУП "ФНПЦ "Алтай" вата минеральная класса ВМСТ по качеству превосходит другие аналоги и изготовленные 120 тысяч тормозных колодок полностью удовлетворяют техническим условиям.

Разработанная технология отмечена золотыми медалями и дипломами конкурса Сибирской Ярмарки (г. Новосибирск).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международном научно-техническом семинаре "Нетрадиционные технологии в строительстве", 25 – 28 мая 1999 г., ТГАСА, г. Томск; Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых "Материалы и технологии XXI века", 22–24 марта 2000 г., ФГУП "ФНПЦ "Алтай", г. Бийск; Международной научно-практической конференции "Утеплители и системы утепления ограждающих конструкций" Сибирской Ярмарки "Siberia", №7, 2001, г. Новосибирск; Научно-практической конференции "Новые технологии в строительстве, машиностроении и энергетике. Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья", 23–25 мая 2001 г., ФГУП "ФНПЦ "Алтай", г. Бийск; II Всероссийской научно-технической конференции "Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях", 20–21 сентября 2001 г., БТИ АлтГТУ, г. Бийск, II Научно-практической конференции "Новые технологии в строительстве, машиностроении и энергетике. Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья", 28–30 мая 2002 г., ФГУП "ФНПЦ "Алтай", г. Бийск; III Научно-практической конференции "Новые технологии в строительстве, машиностроении и энергетике. Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья", 3–6 июня 2003 г., ФГУП "ФНПЦ "Алтай", г. Бийск.

На защиту выносятся:

- комплекс научных исследований, связанных с разработкой и созданием опытно-промышленной установки для отработки аппаратурно-технологических решений, режимов работы производств теплоизоляционных базальтоволокнистых материалов с использованием индукционного метода плавления под заданное сырье, производительность и качество;
- методологический подход к исследованию горных пород на пригодность их для получения супертонких волокон;
- математическая модель процесса плавления шихты;
- результаты исследования механизмов формирования струи расплава в супертонкие волокна с помощью дутьевых акустических устройств;
- результаты исследования процесса сушки минераловатных изделий, методы инженерного расчета параметров камеры сушки и методика оценки времени сушки ковра из базальтовой ваты;
- разработанный комплекс оборудования и результаты отработки технологических режимов приготовления и диспергирования связующего в камеру волокноосаждения при изготовлении теплоизоляционных плит;
- автоматизированная система управления технологическим процессом.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 работ.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 100 наименований, содержит 164 страницы машинописного текста, 41 рисунок, 19 таблиц и 5 приложений

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Представляемая диссертационная работа является комплексной и имеет системный характер исследования технологического процесса с охватом всех основных фаз – плавления сырья, раздува расплава, волокнообразования и формирования теплоизоляционных изделий, что является показателем ее практической направленности.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и дана общая характеристика работы.

Первая глава содержит обзор технологических процессов и аппаратов при изготовлении теплоизоляционных материалов. Приведены преимущества и пути развития технологии, объявленной предметом исследований, среди других технологий подобного назначения, а затем обозначены наиболее важные задачи этих исследований с использованием опытно-промышленной установки. Рассмотрены различные способы переработки расплава в минеральное волокно, подтверждающие преимущества воздушно-дутьевого способа раздува; обоснован метод ввода связующего способом пульверизации (диспергирования) с организацией единого технологического процесса производства минеральной ваты и теплоизоляционных плит на основе создания автоматизированной опытно-промышленной установки.

Для создания опытно-промышленной установки по переработке горных пород в БВМ, пригодной для отработки и совершенствования технологических режимов, модернизации оборудования, производительности и качества выпускаемой продукции, была принята аппаратурно-технологическая схема, приведенная на рисунке 1.

Согласно разработанной аппаратурно-технологической схемы процесс производства осуществляется следующим образом.

Дозирование производится изменением числа оборотов дозатора автоматически в зависимости от нагрузки высокочастотного генератора – источника энергии плавления.

В режиме стабилизации плавления породы полученные излишки расплава непрерывно истекают в виде струи и подаются в дутьевое устройство, где высокоскоростными турбулентными потоками воздуха перерабатываются в волокно.

Фаза формирования теплоизоляционных плит, находясь в едином технологическом потоке с производством ваты, включает одновременное нанесение на образующиеся в камере волокноосаждения волокна связующего, подпрессовку, термообработку ковра в камере сушки и резку его на изделия.

Водная эмульсия связующего готовится в двух реакторах-смесителях, работающих поочередно. Подаваемое с помощью насосов-дозаторов

связующее наносится на волокно в камере волокноосаждения распылительными устройствами – форсунками высокого давления.

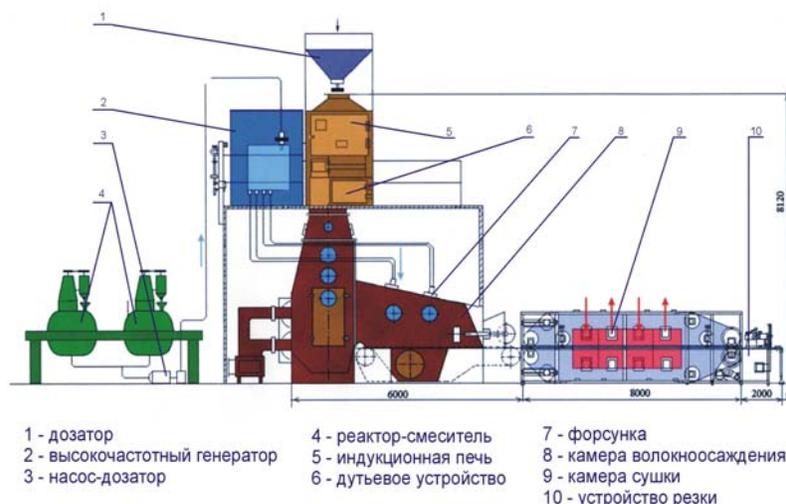


Рис. 1 Аппаратурно-технологическая схема опытно-промышленной установки по выпуску БВМ

Камера сушки служит для формирования и сушки минераловатных изделий. Тепловая обработка осуществляется прососом через минераловатный ковер нагретого до 120÷130 °С воздуха. Для обеспечения заданных геометрических размеров ковер сдавливается двумя ленточными транспортерами.

Анализ функциональной схемы процесса и аппаратурно-технологической схемы predetermined точки текущего технологического контроля по категориям: индикации, блокировки и управления.

Дискретные входные сигналы: генератор включен; конвейер включен; температура масла в трансформаторе ВЧ генератора выше нормы; дымосос включен.

Дискретные выходные сигналы системы управления: управление вентиляторами градирни; управление дозатором.

Аналоговые входные сигналы: сигналы состояния генератора и сигналы состояния технологического процесса.

Сигналы состояния генератора: напряжение анодное; ток анодный; ток сетки; напряжение на контуре; напряжение накала.

Сигналы состояния технологического процесса: расход воздуха; расход воды от тигля; температура воды от тигля; температура охлаждающей воды внутреннего контура; расход воды на охлаждение лампы высокочастотного генератора.

Частотный входной сигнал: частота высокочастотного генератора.

Частотный выходной сигнал: сигнал управления дозатором подачи шихты.

Вторая глава посвящена разработкам новых и совершенствованию существующих процессов и аппаратов технологии производства теплоизоляции

онных базальтоволоконных материалов: математическому моделированию процесса плавления, разработке методов повышения коэффициента полезного действия плавильной печи (оптимизация энергетических и эксплуатационных характеристик ВЧ генератора), управлению процессом плавления, исследованию горных пород на пригодность для производства волокон, переработке расплава с применением акустических устройств.

Математическое моделирование процесса плавления

Процесс плавления является центральным звеном всей технологии производства БВМ. Для управления им необходимо определить зависимости между входными и выходными параметрами. Это позволит грамотно спроектировать алгоритмы автоматизации управления процессом на основе стабилизации выходного расхода расплава и его температуры в заданных пределах, выбор которых обеспечивает требуемое качество БВМ при максимальной производительности установки. Указанные зависимости получены на основе математического моделирования технологического процесса.

Основные компоненты модели и общая структурная схема процесса плавки в "холодном тигле" представлены на рисунке 2.

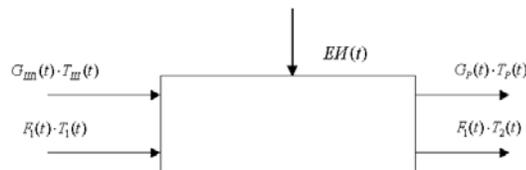


Рис. 2 Общая структурная схема процесса плавки.; $G_{Ш}(t)$, $G_P(t)$ - расход дозируемой шихты и расплава, кг/с; $T_{ш}(t)$, $T_P(t)$ - температура шихты и расплава на выходе, $^{\circ}C$; $F_1(t)$ - расход охлаждающей воды, кг/ч; $T_1(t)$, $T_2(t)$ - температура охлаждающей воды на входе и выходе, $^{\circ}C$; $EI(t)$ - мощность высокочастотного генератора, кВт

Мощность высокочастотного генератора, подводимую к индуктору, можно рассматривать как мощность теплового потока, подводимого к тиглю. Она расходуется на плавление дозируемой шихты с разогревом расплава Q_1 ; нагрев охлаждающей воды Q_2 ; потери, связанные с лучистым излучением с поверхности тигля (расплава) Q_3 ; потери с поверхности тигля за счет конвективного теплообмена с окружающей средой Q_4 ; потери в самом индукторе Q_5 .

Уравнения материального и теплового (энергетического) баланса процесса плавления выглядят следующим образом:

$$\frac{d(\gamma_P \cdot V_P)}{dt} = G_{Ш}(t) - G_P(t); \quad (1)$$

$$\frac{d(V_P \cdot \gamma_P \cdot C_P \cdot T_P)}{dt} = EI(t) - Q_1(t) - Q_2(t) - Q_3(t) - Q_4(t) - Q_5(t); \quad (2)$$

$$\frac{d(V_S \cdot \gamma_S \cdot C_S \cdot T_2)}{dt} = Q_2(t) - Q_6(t), \quad (3)$$

где V_P - объем расплава, дм^3 ; $c_P, c_{Ш}, c_S$ - удельная теплоемкость расплава, шихты и охлаждающей воды, $\text{ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}$; V_S - объем охлаждающей воды в тигле, дм^3 ; γ_P, γ_S - удельная плотность расплава и охлаждающей воды, кг/дм^3 .

С учетом упомянутого выше допущения относительно физико-химических явлений в процессе плавления и для упрощения модели принято:

$$R \cdot V_P \cdot \gamma_P \cdot C_P \cdot \frac{dT_P}{dt} = EI(t) - G_{Ш}(t) \cdot (C_P \cdot T_P - C_{Ш} \cdot T_{Ш}) \cdot R - K_1 \cdot (T_P - T_2) - \alpha \cdot (T_P - T_{OK}); \quad (4)$$

$$R \cdot V_S \cdot \gamma_S \cdot C_S \cdot \frac{dT_2}{dt} = K_1 \cdot (T_P - T_2) - a_1 \cdot F(t) \cdot (T_2 - T_1), \quad (5)$$

где α - коэффициент конвективной теплоотдачи, $\text{кВт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; K - коэффициент теплопередачи, $\text{кВт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; a - коэффициент приведения размерности $a_1 = C_S/860$; T_{OK} - температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$.

Система уравнений (4) и (5) представляет собой математическую модель процесса плавления в холодном тигле, рассматриваемого как объект управления. Поведение модели было изучено в статическом и динамическом режимах.

Следует, что динамические характеристики соответствующих каналов могут быть аппроксимированы апериодическими звеньями первого порядка с постоянными времени τ_{G,T_P} и τ_{F,T_2} , соответственно равными:

$$\tau_{G,T_P} = \frac{R \cdot V_P \cdot \gamma_P \cdot C_P}{R \cdot G_{Ш}^0 \cdot C_P + K_1 + \alpha}; \quad \tau_{F,T_2} = \frac{R \cdot V_S \cdot \gamma_S \cdot C_S}{K_1 + a_1 \cdot F^0}. \quad (6)$$

Установившиеся значения t_P^*, t_2^* (при $t \rightarrow \infty$) соответственно равны:

$$t_P^* = - \frac{(C_P \cdot T_P^0 - C_{Ш} \cdot T_{Ш}^0)}{R \cdot G_{Ш}^0 \cdot C_P + K_1 + \alpha} \cdot g_{Ш}^0; \quad t_2^* = - \frac{a_1 \cdot (T_2^0 - T_1^0)}{K_1 + a_1 \cdot F^0} \cdot f^0, \quad (7)$$

где $g_{Ш}^0$ - производительность дозировки шихты, кг .

Проверка адекватности модели состояла в нахождении расчетных 10% -го увеличения и уменьшения значений входных характеристик (увеличение расхода шихты и воды, изменение температуры расплава и подводимой мощности, повышение температуры входящей воды) и сравнении по полученному эффекту экспериментальных данных с соответствующими данными, полученными из математической модели (таблица 1).

При этом рассматривались следующие параметры: расход шихты - температура расплава; расход входящей воды - температура выходящей воды; мощность подводимая к индуктору - температура расплава; температура входящей воды - температура выходящей воды; одновременное расход шихты и мощность подводимая к индуктору - температура расплава.

Таблица 1

Количественная оценка величин входных параметров на выходные

Характеристики	Параметры				
	Входные	$g_{ш}^0 = \pm 2,5$ кг/ч	$f^0 = \pm 335$ кг/ч	$eu^0 = 5,4$ кВт	$t_1^0 = 10$ °C
Выходные (модель)	$t_p^* = 68,6$ °C	$t_2^* = 0,7$ °C	$t_p^* = 192$ °C	$t_1^* = 10$ °C	$t_p^* = 123$ °C
Выходные (эксперим.)	$t_p = 70 \pm 3$ °C	$t_2 = \pm 0,6 \pm 0,2$ °C	$t_p = 170 \pm 15$ °C	$t_1 = 10$ °C	$t_p = 95 \pm 5$ °C

В работе представлены графические зависимости основных управляемых параметров технологического процесса и приведены расчетные зависимости расхода шихты от температуры расплава. Эти отношения явились основой оптимизации процесса плавления. Чем меньше величина этого отношения, тем меньше энергозатраты на 1 кг исходной шихты.

Выводы

1 Полученные на основе разработанной математической модели количественные оценки влияния входных режимных параметров на значения температуры расплава шихты и выходную температуру охлаждающей воды подтвердили адекватность модели с данными эксперимента. Сходимость расчетных данных с экспериментальными не хуже 5 %.

2 Модель процесса плавления в качестве критерия оптимизации процесса плавления (чем меньше значение критерия качества оптимизации процесса плавления, тем меньше энергозатраты на 1 кг исходной шихты) использована при выборе технических характеристик ВЧ генератора, уточнении рабочих режимов процесса, настройке схемы регулирования и стабилизации.

Разработка методов повышения коэффициента полезного действия плавильной печи

Одним из важнейших параметров индукционного плавления базальта в «холодном» тигле, как и любого электротермического процесса, является КПД. Так как при индукционном способе используется исключительно электрическая энергия, повышение значения КПД приведет к уменьшению затрат и соответственно к снижению себестоимости продукции.

В работе показано, что максимальный КПД достигается при минимальных потерях на аноде лампы ($P_H \ll P_A$).

Более эффективным решением по сравнению с известными является предложенный нами регулятор. В этом случае регулирование происходит непосредственно исходя из значения КПД установки.

Для обеспечения надежной работы генераторной лампы экспериментально определены зависимости КПД генератора от тока сетки.

Предложенный нами способ регулирования мощности генератора не требует предварительной его калибровки генератора.

Исходя из полученных экспериментальных данных, приведенных выше электрический КПД установки, рассчитанный, составляет около 70 % и термический КПД тигля составляет 28,6 %.

Согласно приведенным расчетам, суммарные потери в тигле составляют 37 кВт, что близко к данным эксперимента и подтверждает хорошее качество полученных в работе инженерных приемов расчета.

Выводы

1 Предложенный способ регулирования режима работы генератора, основанный на непосредственном измерении мощности, выделяемой на аноде лампы, позволяет работать с максимальным КПД без предварительной настройки генератора. Режим работы генераторной лампы с минимальным током накала, обеспечивающим требуемую эмиссию, позволяет продлить срок ее службы в несколько раз.

2 Для поддержания работы плавильной печи с закрытым зеркалом расплава необходимо использование автоматической регулировки производительности дозатора шихты, сводящей потери излучением к минимуму. При этом высвободившаяся мощность будет направлена на повышение производительности плавильной печи.

Управление фазой процесса плавления

Физическая основа управления процессом расплава связана с анализом физико-химических процессов, протекающих в тигле, включая его загрузку. Сложность при работе с закрытым зеркалом расплава заключается в том, что в этом режиме необходимо дозировать шихту на уровне критической способности "нормальной" работы плавильной печи, крайне чувствительной к стабильности дозирования, а также влажности и гранулометрическому составу шихты. Но при этом режиме из-за уменьшения потерь излучением с зеркала расплава большая часть мощности генератора расходуется на плавление базальта, что способствует значительному увеличению производительности. Однако большая разница между количеством дозируемой шихты и максимальной производительностью тигля может привести к вытеснению расплава из тигля и прекращению плавления. При увеличении массы нерасплавленной шихты ванна расплава вытесняется из области нагрева, что приводит к уменьшению нагрузки на генератор.

Для обеспечения условий рационального плавления генератор, используемый в нашей установке, устроен так, что с увеличением напряжения на индукторе одновременно уменьшается рабочая частота генератора. Обе эти зависимости мы используем для управления процессом дозирования шихты - для поддержания ванны в квазистационарном состоянии. Это является новым моментом в технике процесса плавления базальтов индукционным методом.

Исследование зависимости частоты генератора от загрузки тигля позволило создать алгоритм оптимизации по критерию режима плавления шихты при установленной мощности генератора. Практический алгоритм управления

технологическим процессом основывается на эмпирических зависимостях, полученных при экспериментальных исследованиях на опытно- промышленной установке.

Алгоритм основан на методе пошагового приближения к оптимальной рабочей точке установки (максимально возможной производительности) и удержании в рабочем состоянии при заданных мощности генератора и количестве используемой шихты. При этом величина шага выбирается с учетом величины производительности дозатора шихты на момент включения адаптивного алгоритма и его заданной (желаемой) производительности. Увеличение производительности дозатора наращивается дискретно с переменным шагом, который рассчитывается делением разницы между текущим и заданным значением производительности по методу «золотого сечения».

Система управления работает согласно блок-схеме алгоритма, представленного на рисунке 3.

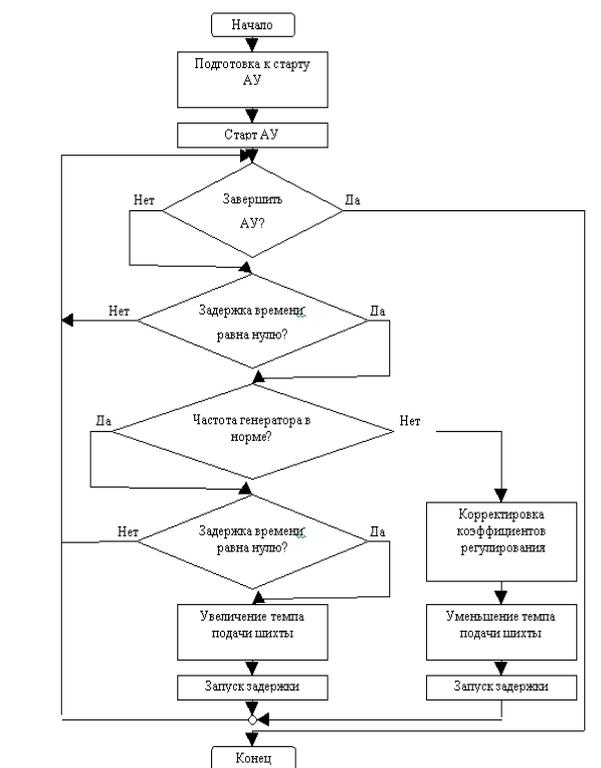


Рис. 3 Блок-схема алгоритма управления

На рисунке 4 приведена графическая зависимость частоты генератора от количества дозируемого сырья, работающая по приведенной блок-схеме алгоритма управления технологическим процессом.

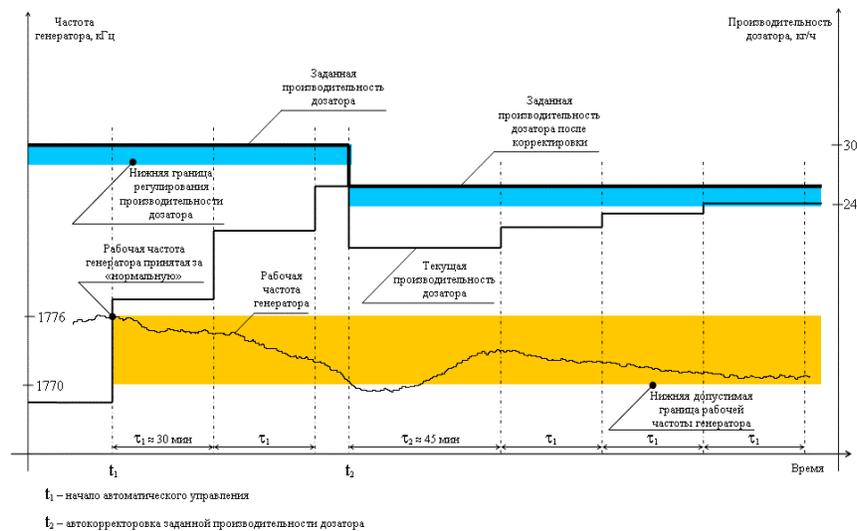


Рис.4 Зависимость частоты генератора от количества дозируемого сырья

Выводы

1 Уменьшение потерь излучением с зеркала расплава обеспечивается изменением энергетического режима работы генератора и скорости дозирования шихты так, чтобы как можно большая часть поверхности ванны была засыпана шихтой. При номинальной выходной мощности генератора устанавливается максимально допустимая производительность дозатора.

2 Для обеспечения режима работы установки с закрытым зеркалом расплава необходимо регулирование производительности дозатора в зависимости от частоты генератора. Автоматическое регулирование производительности дозатора сырья позволяет перейти в режим работы плавильной печи с закрытым зеркалом расплава, при этом производительность тигля увеличивается на 20%.

Исследование горных пород на пригодность для производства волокон

Выбор горной породы для производства БВМ зависит от особенностей технологического процесса плавления, в который на практике приходится вносить коррективы, обусловленные минеральным и химическим составом сырья. Для этого необходимо располагать определенной методологией его исследования.

Известно, что пригодность стекол для выработки из них различного вида волокон определяется однородностью и газонасыщенностью расплавов, а также их физико-химическими составами и, в первую очередь, поверхностным натяжением, вязкостью, кристаллизационной способностью и смачиваемостью. Поскольку для получения расплава в работе используется индукционный способ, обеспечивающий при повышенных температурах полную его гомогенность

несмотря на высокое поверхностное натяжение, а раздув расплава в волокна осуществляется при температурах значительно выше верхнего предела кристаллизации ($T_{в.п.к}$), в отсутствие фильтрных питателей из драгметаллов мы предложили, что основными критериями пригодности горных пород для выработки супертонкого волокна в данном случае могут служить вязкость и ее температурная зависимость.

Результаты исследований горных пород Сибирского региона - диабаз Васильевского (Кемеровская область) и габбро Малетинского (Алтайский край) месторождений подтвердили возможность использования предложенного методологического подхода в целях установления пригодности сырья для получения базальтовой ваты на установках с индукционным способом плавления (таблицы 2 и 3).

Таблица 2

Температурный интервал плавления, поверхностное натяжение и кристаллизационная способность расплавов исследуемых пород

Наименование месторождения	Номер образца	$T_{н.пл}$, °С	$T_{к.пл}$, °С	Поверхностное натяжение, Н/м, при T , °С		Температура кристаллизации		
						Объемная, при T , °С	Сплошная (поверхностная), при T , °С	$T_{в.к}$ (единичная), при T , °С
				1250°С	1300°С			
Малетинское, П.1	1	1240	1450	0,373	0,382	1230	1250	1270
	2	1220	1450					
	3	1250	1450					
Малетинское, П.2	1	1220	1420	0,374	0,377	отс.	1235	1260
	2	1230	1440					
	3	1240	1450					
Малетинское, П.3	1	1220	1460	0,382	0,392	1210	1265	1295
	2	1220	1420					
	3	1210	1380					
Васильевское	1	1170	1450	0,363	0,375	1200	1285	1300
	2	1180	1450					
	3	1180	1420					

Примечание: $T_{н.пл}$, $T_{к.пл}$ – начальная и конечная температура плавления; П.1, П.2, П.3 – пробы

Таблица 3

Зависимость вязкости расплавов исследуемых пород

Месторождение	Вязкость, Па·с, при T , °С					ΔE_{η} , кДж/моль
	1250	1300	1350	1400	1450	
Малетинское П.1	44,1	28,7	12,5	6,9	3,9	260
П.2	26,6	14,4	7,8	4,9	3,0	256
П.3	67,6	37,2	19,9	9,4	6,2	258
Васильевское	80,5	43,3	21,3	13,3	9,5	231

Примечание: ΔE_{η} – энергия активации вязкого течения

Выводы

1 Уровень поверхностного натяжения исследованных сибирских пород достаточно высок, однако процессы плавления ускоряются при повышении температуры в связи с понижением вязкости расплава, что обеспечивается индукционным способом.

2 Хотя расплавы исследованных пород обладают высокой кристаллизационной способностью, переработка их в супертонкие волокна индукционным способом при температуре выше 1350 °С возможна.

3 Температурная зависимость вязкости прогнозирует стабильность процесса волокнообразования.

4 Использованный методологический подход к исследованию горных пород на пригодность для производства супертонких волокон индукционным методом может быть принят базовым.

Переработка расплава в супертонкие волокна с применением акустических устройств

В задачу настоящего раздела входит отработка эффективных режимов работы оригинальных раздувочных головок струйного типа, обоснованный выбор которых приведен в диссертации.

При этом качество продукции зависит как от конструкции раздувочной головки, которая определяет механизм расщепления струи на капли, элементарные струйки и образования из них волокон, так и параметров струи расплава.

Раздувочные головки, рассматриваемые в данной работе и используемые в разрабатываемом технологическом процессе, отличаются конструктивным исполнением и ориентированы в рамках поставленной задачи на обеспечение производительности установок получения БВМ в диапазоне 150÷400 т/год с требуемым качеством волокна.

Задачи данного раздела:

- 1 Экспериментальная отработка струйных раздувочных головок.
- 2 Исследование влияния спектра звука на качество получаемого волокна.
- 3 Выбор оптимальной конструкции раздувочной головки.
- 4 Расчетная оценка диаметра получаемого волокна при заданной производительности.

Для струйной головки были изготовлены комплекты сменных частей, позволяющие изменять размеры кольцевого сопла.

На всех экземплярах головки были опробованы несколько режимов работы. Зависимости параметров, при котором проводилась наработка ваты, и результаты анализа ее качества приведены в таблице 4.

Проведен расчет наиболее вероятного диаметра образующихся волокон при заданной производительности. Расчет площади критического сечения головки при заданной толщине струи расплава, удалось привести благодаря

эмпирической формуле, связывающей диаметр образующихся волокон с параметрами струи расплава и энергоносителя.

Таблица 4

Основные характеристики образцов ваты, наработанной с использованием различных вариантов струйной головки

Вариант	1			2			3		
Образец	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№9
Давление, МПа	0,2	0,25	0,30	0,20	0,25	0,30	0,20	0,25	0,30
Плотность, кг/м ³	16,8	14,9	11,2	14,6	14,0	13,5	10,5	13,5	13,5
Средний диаметр волокна, мкм	1,37	1,48	1,27	1,16	1,14	1,21	1,30	1,27	1,25
Содержание неволоконистых включений, %	13,1	7,24	5,68	6,06	7,6	6,06	4,72	4,2	6,0

Выводы

1 Новым результатом в области разработки и исследований, проведенных в рамках диссертационной работы, является то, что для возбуждения мощного акустического излучения найдены оптимальные соотношения размеров газового сопла, резонирующей полости и её удаления от сопла, зависящих от параметров газа на срезе сопла для дутьевой головки струйного типа, что позволяет подобрать и отработать дутьевые устройства, обеспечивающие (для различных мощностей) необходимую производительность установок и качество готовой продукции.

2 Представлена расчетная оценка критического сечения сопла головки для получения волокон с различным диаметром. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными и позволяют прогнозировать использование струйной головки в установках с большей производительностью по расплаву (60÷70 кг/ч).

В третьей главе излагается прикладная, инженерная сторона практического использования волокна в технологии изготовления плит.

Выбор связующего для производства теплоизоляционных изделий

Цель исследований – получение связующего и изделий на его основе с повышенной температуростойкостью и долговечностью.

Исследования по выбору связующего для производства базальтоволоконистых теплоизоляционных плит показали эффективность использования для этих целей композиций из компонентов органического и неорганического происхождения. Разработанное при участии автора комбинированное связующее, содержащее в своем составе поливинилацетатную дисперсию, натриевое жидкое стекло, поверхностно-активное вещество и гидрофобизатор, обеспечивает высокие эксплуатационные свойства получаемых изделий, превосходящих по термо- и водостойкости зарубежные аналоги (таблица 5).

Разработка связующего осуществлялась с учетом стоимости и доступности исходных компонентов, а также универсальности применения его для различных технологий получения теплоизоляционных изделий.

Таблица 5

Сравнительные характеристики теплоизоляционных плит

Наименование показателей	Технические характеристики	
	ФГУП "ФНПЦ "Алтай"	Фирма "Rockwool"
Диаметр волокна, не более, мкм,	3	6
Плотность, кг/м ³	50±150	50±150
Прочность на сжатие при 10 %-й линейной деформации, МПа	0,044	0,046
Предельная температура применения без объемной усадки, °С	от -270 до +700	от -120 до +400
Коэффициент теплопроводности, Вт/ (м·К), при 25 °С	0,038±0,040	0,039±0,048
Водопоглощение за 24 ч, %, не более, по массе по объему	50 6	80 10

Разработка комплекса оборудования и отработка технологических режимов при изготовлении теплоизоляционных плит

Для введения связующего в минераловатный ковер выбран метод пульверизации (распыления) раствора связующего в камере волокноосаждения, при котором:

- значительно снижаются затраты электроэнергии;
- создается возможность организации единого автоматизированного технологического процесса производства базальтовой ваты и теплоизоляционных плит на ее основе, приводящего к повышению экономической эффективности производства за счет экономии трудовых ресурсов и дополнительного оборудования;
- обеспечивается возможность раздельного получения базальтовой ваты и плит на одной и той же установке без переналадки оборудования.

Для реализации аппаратурно-технологической схемы опытно-промышленного производства теплоизоляционных плит потребовалась разработка камеры волокноосаждения, системы приготовления и ввода связующего, камеры сушки и устройства для резки минераловатного ковра на плиты заданных размеров.

Для обеспечения более равномерного удаления влаги из минераловатного ковра и повышения КПД камера сушки выполнена в виде четырех автономных секций, в которые горячий воздух подается и просасывается последовательно в каждой секции в противоположных направлениях, верхнего и нижнего транспортера и устройств, предназначенных для очистки сеток транспортеров. Сушка осуществляется потоком нагретого воздуха, который нагнетается в сушильную камеру вентилятором и продувается через слой волокна. Воздух, прошедший сквозь слой волокна, вместе с образовавшимся в процессе сушки парами воды удаляется благодаря созданию на выходе из сушильной камеры

разрежения, вследствие которого осуществляется отсос из зоны сушки отработанного воздуха, содержащего водяной пар.

Выводы

1 Выбрано связующее для базальтоволоконистых теплоизоляционных материалов, обеспечивающее их высокие эксплуатационные характеристики.

2 Отработан технологический процесс получения теплоизоляционных плит с доводкой параметров опытно-промышленной установки до оптимальных, обеспечивающих необходимую производительность и качество выпускаемой продукции. Выпущен регламент технологического процесса 07508902.02200.00056.

Исследование процесса сушки минераловатных изделий.

Расчет параметров камеры сушки

Особенности процесса сушки влажных материалов обусловлены характером изменения локального влагосодержания с течением времени, поэтому для выбора рационального способа сушки необходимо определить время пребывания материала в сушильном аппарате. Нами предлагается экспериментально-расчетная методика оценки времени сушки ковра из базальтовой ваты в зависимости от параметров материала и сушильного агента – воздуха.

При конвейерном способе сушки сформированный и обработанный водным раствором связующего минераловатный ковер проходит последовательно четыре камеры с покамерной реверсией сушильного агента через слой влажного материала. При реверсивной продувке слоя режим сушки характеризуется параметрами материала (среднее начальное влагосодержание слоя и удельная нагрузка) и сушильного агента (температура, влажность и скорость движения).

Выводы

1 Предложена экспериментально-расчетная методика оценки времени сушки ковра из базальтовой ваты в зависимости от параметров материала и сушильного агента – воздуха. Методика позволяет с достаточной точностью проводить проектные расчеты камеры сушки на различные производительности для получения плит различной плотности.

2 Найдено оптимальное время сушки и получены все необходимые параметры сушильной камеры.

В четвертой главе приведены данные по разработке АСУТП для действующего производства БВМ.

Автоматизация производства имеет важное значение, так как обеспечивает оптимизацию технологического процесса. Ядром АСУТП является персональный компьютер общего назначения.

Основные задачи АСУТП:

тестирование элементов, входящих в состав АСУ, на неисправность

- управление дозатором шихты;
- аварийная звуковая и световая сигнализация при возникновении критических или близких к критическим ситуаций;
- аварийное отключение генератора при возникновении критических ситуаций;
- архивирование состояния процесса с необходимой дискретностью.

При проектировании АСУТП решались следующие задачи:

- разработка структуры системы контроля и отображения информации о ходе технологического процесса;
- выбор технических и программных средств автоматизации с учетом мировой конъюнктуры рынка;
- разработка виртуального пульта оператора – программно-технического средства, позволяющего представить все необходимые сведения о течении технологического процесса на экране дисплея;
- обеспечение надежности системы управления контроля основными технологическими объектами (выполняется как параллельная автономная задача, что также упрощает отладку и дальнейшую модернизацию системы управления).

Применение современного эргономического решения – разработка и применение виртуального пульта АСУТП имело целью не только уменьшить количество функциональных электрических элементов системы в целом, а следовательно, и увеличить ее надежность, но и значительно упростить процесс создания программного обеспечения системы.

Предусмотренная архивация параметров процесса позволяет контролировать работу персонала путем протоколирования его действий, а также и использовать эту важную информацию для дальнейших исследований.

Визуализация хода технологического процесса представлена окнами – экранами.

В пятой главе показано практическое применение результатов исследований и их внедрение с представлением пяти актов в приложении.

Экспериментальные исследования по выбору связующего, модернизации оборудования и разработке АСУТП позволили организовать в ФГУП "ФНПЦ "Алтай" производство по переработке минерального сырья в теплоизоляционные изделия (вату и плиты) и позволили усовершенствовать базовую технологию, повысить надежность оборудования и создать основу для разработки оборудования под исходное сырье, конкретную производительность и требуемое качество продукции.

В основу создания производств БВМ положен модульный принцип, позволяющий гибко и эффективно вводить мощности очередями, как правило, на имеющихся производственных площадях (таблица 6).

Таблица 6

Краткая характеристика технологических модулей

Наименование	ВМСТ (вата)	ВМСТ (вата)	Плиты
Годовой выпуск, т	150	400	400
Габаритные размеры, м	12х6х9	12х6х9	30х6х9
Обслуживающий персонал, чел.	13	13	17
Расход электроэнергии на 1 тонну продукции, кВт	6000	5300	8000
Расход воздуха на 1 тонну продукции, м ³	22000	27500	33000
Расход сырья, кг/кг:			
шихта	1,15	1,15	1,15
связующее	-	-	0,10
Давление воздуха, МПа	0,6	0,6	0,6
Давление охлаждающей воды, МПа	0,20±0,25	0,20±0,25	0,20±0,25
Жесткость воды, мг, не более	8,5	8,5	8,5
Удельное электрическое сопротивление, (ом·см), не менее	20000	20000	20000
Система охлаждения	Замкнутый водооборот		

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1 Выполнен комплекс научных исследований, в результате которых создана действующая опытно-промышленная установка, позволяющая эффективно отрабатывать аппаратурно-технологические решения режимов работы производств теплоизоляционных базальтоволокнистых материалов индукционным методом под заданные сырье, производительность и качество.

2 Разработана математическая модель процесса плавления шихты, на основании которой получены количественные оценки влияния входных параметров технологического процесса на выходные. Модель использована при выборе рабочих режимов процесса плавления и его стабилизации в автоматическом режиме.

3 На основе исследования горных пород сибирских месторождений предложен подход к подбору сырья для производства минерального волокна индукционным методом, который может быть принят базовым при создании новых производств, использующих сырье новых месторождений.

4 Изучены механизмы формирования струи расплава в супертонкие волокна с помощью дутьевых акустических устройств и выбраны их оптимальные рабочие конструкции для различных производительностей и качества волокна.

5 Проведены исследования процесса сушки минераловатных изделий, разработаны метод инженерного расчета параметров камеры сушки и методика оценки времени сушки ковра из базальтовой ваты в зависимости от параметров материала и сушильного агента. Метод позволяет с достаточной для практики точностью проводить проектные расчеты сушильной камеры для получения плит.

6 Разработан комплекс оборудования и отработаны технологические режимы приготовления и диспергирования связующего в камеру волокноосаждения при изготовлении теплоизоляционных плит.

7 Разработана, реализована и внедрена в составе действующего производства цифровая автоматизированная система управления технологическим процессом с возможностью ее адаптации под производительность 150÷400 тонн/год и выше.

8 Проведенные разработки положены в основу технических решений при тиражировании производств БВМ и внедрены на пяти российских предприятиях.

Основные положения диссертации представлены в следующих опубликованных работах

1 Потапов М.Г., Татаринцева О.С., Литвинов А.В. и др. Переработка нерудных горных пород в теплоизоляционные строительные и промышленные материалы: Сб. докл. Международного научно-технического семинара "Нетрадиционные технологии в строительстве", 25–28 мая 1999 г. Часть II, - Томск: Изд-во ТГАСУ, 1999 . – С. 148–150.

2 Потапов М.Г., Татаринцева О.С., Литвинов А.В. и др. Проблемы создания и производства базальтоволоконистых материалов строительного, промышленного и технического назначения // Сб. докл. Международной Сибирской Ярмарки "Siberia". 2000. – №6. – С. 12.

3 Потапов М.Г., Татаринцева О.С., Литвинов А.В. Технологические особенности производства минераловатных плит из природного камня // Материалы и технологии XXI века: Сб. докл. I Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, 22–24 марта 2000 г. – Бийск. – М.: ЦЭИ «Химмаш». 2000. – С. 280–283.

4 Потапов М.Г., Татаринцева О.С., Литвинов А.В. Технология получения экологически чистых теплоизоляционных материалов из горных пород / Утеплители и системы утепления ограждающих конструкций // Сб. докл. Международной научно-практической конференции Сибирской Ярмарки "Siberia". 2001. – № 7. – С. 26–27.

5 Пахомов В.П., Литвинов А.В. Повышение эффективности плавления горных пород индукционным методом в холодном тигле // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Сб. докл. Всероссийской научно-практической конференции, 23–25 мая 2001 г. – Бийск. – М.: ЦЭИ «Химмаш». – 2001. – С. 29–30.

Потапов М.Г., Татаринцева О.С., Литвинов А.В., и др. Опытнo-промышленная установка по отработке технологии получения теплоизоляционных материалов из нерудных горных пород // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Сб. докл. Всероссийской научно-практической конференции, 23–25 мая 2001 г. – Бийск.

6 – М.: ЦЭИ «Химмаш». – 2001. – С. 13–15.

7 Абрамов Г.Г., Звольский Л.С., Литвинов А.В. и др. АСУ производства базальтовой ваты // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Сб. докл. II Всероссийской научно-технической конференции, 20–21 сентября 2001 г., – Бийск: Изд-во АлтГТУ. – 2001. – С. 10–11.

8 Литвинов А.В. Технологические особенности производства супертонкого базальтового волокна и теплоизоляционных плит на ее основе // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Сб. докл. II Всероссийской научно-технической конференции, 20–21 сентября 2001 г. – Бийск: Изд-во АлтГТУ. – 2001 г. - С. 25–26.

9 Олейников Б.Д., Литвинов А.В., Татаринцева О.С. и др. Экологическая безопасность производств теплоизоляционных материалов из базальта // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Сб. докл. II Всероссийской научно-практической конференции, 28–30 мая 2002 г. – Бийск. – М.: ЦЭИ «Химмаш». – 2002. – С. 9–10.

10 Литвинов А.В., Хрусталева Ю.В., Татаринцева О.С. и др. Расчет продолжительности процесса сушки при получении теплоизоляционных плит из базальтовой ваты // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Сб. докл. II Всероссийской научно-практической конференции 28–30 мая 2002 г. – Бийск. – М.: ЦЭИ «Химмаш». – 2002. – С. 16–19.

11 Татаринцева О.С., Дзюина Г.М., Литвинов А.В. Сравнительная оценка технико-экономических показателей производств базальтоволокнистых материалов // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Сб. докл. II Всероссийской научно-практической конференции, 28–30 мая 2002 г. – Бийск. – М.: ЦЭИ «Химмаш». – 2002. С. – 22–25.

12 Филиппов В.П., Кулагин В.С., Литвинов А.В. и др. Разработка математической модели процесса получения расплава в холодном тигле// Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Сб. докл. III Всероссийской научно-практической конференции, 3–6 июня 2003 г. – Бийск. – М.: ЦЭИ «Химмаш». – 2003. – С. 29–34.

13 Бессонов А.Ю., Литвинов А.В., Кожарский С.П. Влияние спектра звука раздувочных головок на параметры минеральной ваты // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Сб. докл. III Всероссийской научно-практической конференции, 3–6 июня 2003 г. – Бийск. – М.: ЦЭИ «Химмаш». – 2003. – С. 39–40.

14 Абрамов Г.Г., Абрамов Д.Г., Литвинов А.В. и др. Совершенствование автоматизированной системы управления производством базальтовой ваты //

Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Сб. докладов III Всероссийской научно-практической конференции, 3–6 июня 2003 г. – Бийск. – М.: ЦЭИ «Химмаш». – 2003. – С. 40–42.