

На правах рукописи



**Волокитин Олег Геннадьевич**

**ПОЛУЧЕНИЕ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ  
ПРОИЗВОДСТВЕ МИНЕРАЛЬНОГО  
ВОЛОКНА**

05.17.11 – Технология силикатных  
и тугоплавких неметаллических материалов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Н.К. Скрипникова

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор В.В. Козик  
доктор технических наук,  
профессор П.М. Плетнев

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук  
Институт теплофизики  
им. С.С. Кутателадзе Сибирское  
отделение РАН

Защита состоится «15» июня 2010 г. в 14 ч 00 мин на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.08 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 43а, корп. 2, ауд. 117.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь совета  
по защите докторских  
и кандидатских диссертаций



Т.С. Петровская

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Огромное количество золошлаковых отходов скапливается в отвалах энергетических производств, нарушая тем самым экологическую обстановку в местах их размещения. Сдерживающим фактором утилизации этих отходов, имеющих в своем составе до 49–61 %  $\text{SiO}_2$ , является высокая температура их плавления. В связи с тем, что в настоящее время получить расплав из силикатсодержащих отходов энергетических производств, имеющих температуру плавления порядка 1600–1700 °С, с использованием традиционных технологий не представляется возможным из-за низких температур, реализуемых существующими плавильными агрегатами, возникает необходимость в использовании энергии низкотемпературной плазмы в разрабатываемой технологии, которая обладает высокой концентрацией энергии и температурой 3000–5000 °С. Также использование высококонцентрированных потоков снижает энергозатраты при получении силикатного расплава за счет сокращения времени образования расплава. Актуальным является применение плазменных технологий при получении таких дефицитных материалов стройиндустрии, как минеральная вата, что позволит сделать существующие производства более экономичными и решить проблемы экологии.

Об актуальности исследований говорит тот факт, что, несмотря на некоторые успехи, широкомасштабное внедрение плазменных технологий в области производства теплоизоляционных материалов сдерживалось из-за отсутствия теоретических и технологических предпосылок по созданию специализированных высокопроизводительных аппаратов, информативных данных об их электро- и теплофизических характеристиках при получении силикатного расплава.

Работа выполнялась при поддержке гранта РФ МК. 1110.2008.8, в соответствии с программами Рособразования РФ в рамках целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» по теме № 2.1.06 «Теплофизические и физико-химические процессы в строительных материалах при воздействии на них высококонцентрированных тепловых потоков»

№ ГР 01.200804433, а также с планами и программами НИР НИИСМ при ТГАСУ.

**Объект исследования** – отходы энергетических производств (зола ТЭС, отходы горючих сланцев), а также плазменные технологические процессы при получении силикатных расплавов и волокон из них.

**Предмет исследования** – выбор и анализ исходного сырья; исследование характеристик экспериментальной плазменной установки; энергетические показатели процесса плавления сырья; физико-химические процессы, протекающие в силикатных расплавах; температурно-временные условия плавления сырья и волокнообразования.

**Целью работы** является разработка технологии получения высокотемпературных силикатных расплавов для изготовления минерального волокна с использованием устройств низкотемпературной плазмы.

Для достижения поставленной цели определены следующие **задачи**:

– обосновать использование плазменного нагрева в процессе плавления тугоплавкой шихты;

– создать эффективные плазменные устройства и установить их физические, энергетические характеристики и оптимальные рабочие режимы при плавлении тугоплавкой шихты;

– разработать физико-математическую модель для установления характера распределения температурных полей в сечениях гарнисажного слоя;

– исследовать физико-химические процессы структурообразования, протекающие при получении расплава и волокон.

**Научная новизна:**

1 Установлено, что расчетное поле температур (1800–2000 °С) при удельных тепловых потоках ( $q = 1,8\text{--}2,6 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>) соответствует условиям получения силикатного расплава на поверхности гарнисажного слоя.

2 Установлено, что при оптимальном режиме работы плазменного генератора (при мощности  $P = 35,2\text{--}56$  кВт и удельных тепловых потоках  $q = 1,8\text{--}2,6 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>) расплав гомогенизируется в плавильной печи, что обеспечивает в дальнейшем формирование волокон с минимальным количеством неоднородных включений, удельные энергетические затраты при получении расплава

составляют 1,5–2,1 кВт/кг, что в 2–2,5 раза меньше, чем в существующих технологиях.

3 Полученный из техногенных отходов силикатный расплав характеризуется содержанием оксида кремния более 60 %, что позволяет получать минеральные волокна, обладающие повышенными термической и химической стойкостями.

4 Установлена возможность повышения температуры струи расплава от 1650 до 1790 °С при пропускании через нее электрического тока, что позволяет получать полностью однородный по химическому составу расплав.

#### **Практическая значимость работы:**

1 Расширение номенклатуры исходного сырья (отходы энергетических производств) для производства минеральной ваты с повышенными эксплуатационными характеристиками.

2 Созданная принципиально новая плазменная установка для получения тугоплавких силикатных расплавов, техническая новизна которой подтверждена патентами РФ №2355651, №2344093.

3 Техническое решение, направленное на дополнительный нагрев струи силикатного расплава, реализовано на предприятии по производству минерального волокна ООО «Черниговский базальт» (г. Кемерово).

#### **На защиту выносятся:**

1 Обоснование выбора исходного сырья для получения минерального волокна с повышенными эксплуатационными характеристиками с учетом температурно-временных условий его плавления.

2 Результаты численных расчетов температурных полей по сечению гарнисажного слоя.

3 Способ и устройство для получения тугоплавких силикатных расплавов с использованием энергии плазмы при производстве минерального волокна и установление оптимальных режимов плавления сырьевых материалов.

4 Результаты исследований физико-химических процессов, протекающих при получении силикатных расплавов и волокон из них.

**Апробация работы и публикации.** Основные положения и результаты работ, составляющих содержание диссертации, обсуждались на совещаниях, семинарах, конференциях всероссийского и международного уровней, таких как X Международная

конференция «Плазма газового разряда и ее применение в технологиях» (Томск, 2007); VII, VIII, IX Всероссийская научно-практическая конференция «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья» (Белокуриха, 2007–2010); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Наноматериалы и технологии» (Улан-Удэ, 2008); 65-я Всероссийская научно-практическая конференция НГАСУ (Сибстрин) «Актуальные проблемы строительной отрасли» (Новосибирск, 2008); VI International Conference “Plasma Physics and Plasma Technology” (Minsk, Belarus, 2009); III Всероссийская конференция «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине» (Новосибирск, 2009); 2-я научно-практическая конференция с международным участием «Наноматериалы и нанотехнологии. Наноразмерные структуры в физике конденсированного состояния. Технологии наноразмерных структур» (Улан-Удэ, 2009).

По материалам диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 6 статей в рекомендуемых ВАК изданиях, 14 докладов в сборниках конференций, получены 3 патента на изобретения.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов по работе, списка литературы из 177 наименований. Работа изложена на 145 страницах текста, содержит 39 рисунков и 8 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследований, изложена научная новизна, практическая значимость работы.

**В первой главе (Состояние науки и практики в области получения силикатных расплавов при производстве минерального волокна)** содержится обзор литературы, в котором изложены сведения о направлениях работ и достигнутых результатах в области получения силикатных расплавов. В ней рассмотрены и проанализированы способы плавления минерального сырья и формирования минеральных волокон из расплавов. Дано описание физико-химических процессов, протекающих при образовании расплавов в силикатных системах в условиях высоких температур. Анализ выполнен на основе результатов работ, проведенных под руководством М.Ф. Жукова, В.Д. Шимановича, Ф.П. Вурзеля,

А.Л. Моссе, К.Э. Горяйнова, Саковича Г.В., Кутолина В.А., Татаринцевой О.С., Павлова В.Ф. На основе проведенного анализа научной литературы сформулированы цели, задачи исследования.

**Во второй главе (Характеристика сырья, расплавов и методы их исследования)** в результате исследования различного по химическому и минералогическому составам исходного сырья (базальт, зола, отходы горючих сланцев) установлены критерии их пригодности для получения минерального волокна. Проведен анализ существующих методов исследования исходного сырья и продуктов его плавления. Приведены данные по влиянию химического состава сырья и условий получения силикатного расплава на физико-химические параметры получаемого волокнистого материала. В качестве сырья для получения силикатных расплавов использовались базальт и отходы энергетических производств (зола, отходы горючих сланцев). Химический состав используемого сырья, приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав сырьевых компонентов

Наименование оксида	Содержание оксида, мас. %		
	Базальт	Зола ТЭС	Отходы горючих сланцев
SiO <sub>2</sub>	49,40	51,16	61,59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,17	34,57	23,36
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,70	3,62	7,91
CaO	8,98	8,33	1,60
MgO	3,37	0,91	1,27
Прочие	16,38	1,41	4,27
M <sub>K</sub> *	5,30	9,20	29,60

\* модуль кислотности.

Приводятся характеристики сырьевых материалов и методики исследования, используемые в работе (химический, минералогический, дифференциально-термический анализ (Du Pont – 1090), рентгенофазовый анализ (ДРОН-3М), ИК-спектроскопический анализ (Nicolet 6700), растровая электронная микроскопия (S-3700 N) и др). Приводится и обосновывается структурно-методологическая схема работы.

**Третья глава (Исследование плавильных агрегатов для получения силикатных расплавов и волокон из них с использованием низкотемпературной плазмы).** Для реализации поставленных задач был создан экспериментальный комплекс, вклю-

чающий в себя плазменный источник тепла для получения расплава из тугоплавких силикатсодержащих материалов и последующей выработкой волокнистого материала (рисунок 1).

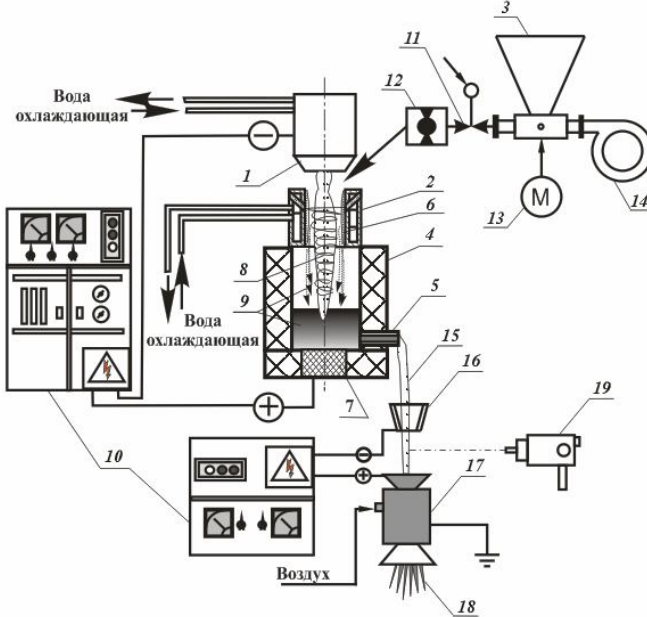


Рисунок 1 – Комплекс оборудования для получения силикатного расплава и минеральных волокон:

1 – катодный узел; 2 – концентратор тепловой энергии;

3 – дозирующее устройство (питатель); 4 – плавильная печь; 5 – летка; 6 – гарнисажный слой; 7 – графитовый анод; 8 – плазменная дуга; 9 – расплав; 10 – источник питания; 11 – шиберная заслонка; 12 – электромеханический ротационный расходомер; 13 – управляемый двигатель постоянного тока в системе подачи сырья; 14 – вентилятор высокого давления; 15 – струя расплава;

16 – направляющая воронка; 17 – устройство для раздува расплава;

18 – минеральные волокна; 19 – оптический пирометр

Принцип работы установки основан на взаимодействии высококонцентрированных потоков плазмы 5 с порошкообразным сырьевым материалом (зола, отходы горючих сланцев) фракцией от 50 мкм до 2 мм. Подача сырья осуществляется тангенциально непосредственно в область горения дуги. Подаваемое сырье под действием высококонцентрированных потоков плазмы расплавляется и осаждается на стенках водоохлаждаемого концентратора 2, образуя при этом гарнисажный слой, который обладает низкой теплопроводностью. Соответственно создаются благоприятные ус-



ловия для концентрации тепловой энергии плазменного потока и стекания с гарнисажа избыточного расплава в бассейн печи, где он подвергается дополнительному омическому нагреву за счет протекания электрического тока.

Экспериментально для установления тепловых характеристик плазменной струи определялась зависимость удельных тепловых потоков дугового разряда от мощности генератора плазмы (таблица 2).

Таблица 2 – Рабочие режимы электроплазменного генератора и теплофизические параметры дугового разряда

№ режимов	Мощность плазмотрона, кВт	Сила тока, А	Напряжение, В	Удельный тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup>
1	23,8	140	170	$1,1 \cdot 10^6$
2	35,2	220	160	$1,8 \cdot 10^6$
3	56	400	140	$2,6 \cdot 10^6$
4	59,4	440	135	$3,0 \cdot 10^6$

В ходе проведения экспериментов были установлены режимы для получения расплава необходимого для выработки качественных волокон, которые составляли  $q = 1,1 - 3,0 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

С целью прогнозирования распределения температурных полей по сечению гарнисажного слоя при установленных тепловых потоках была разработана физико-математическая модель, результаты расчетов которой представлены на рисунке 2.

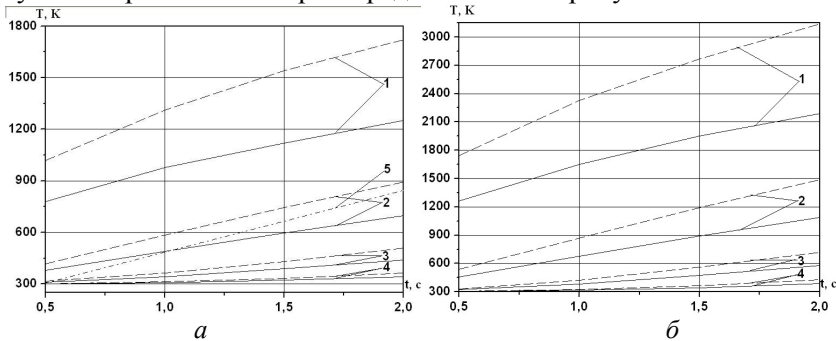


Рисунок 2 – Изменение температуры гарнисажного слоя в различных сечениях со временем:

$a - q_G = 1 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, ---  $q_G = 1,5 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>;  $b - q_G = 2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, ---  $q_G = 3 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.  
 1 – на глубине 1 мм; 2 – на глубине 2 мм; 3 – на глубине 3 мм; 4 – на глубине 4 мм;  
 5 – показание термомпары, заделанной на 2 мм от нагреваемой поверхности при  $q_G = 1,5 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>

Полученные данные позволяют прогнозировать диапазон изменения удельных тепловых потоков  $q = 1,8 - 2,6 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> оптимальных для плавления используемых сырьевых материалов.

Оценка производительности экспериментальной установки по получению расплава из тугоплавких силикатсодержащих материалов представлена на рисунке 3.

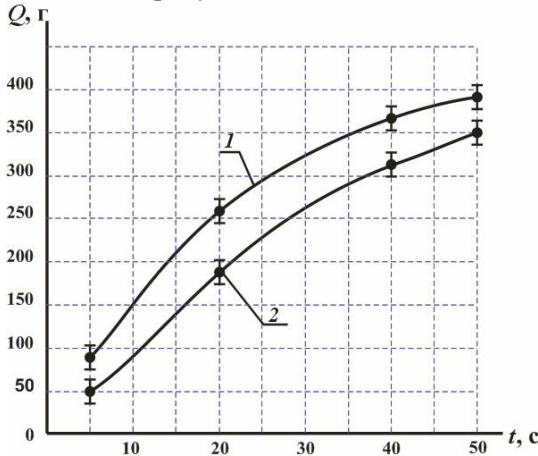


Рисунок 3 – Зависимость количества образованного расплава ( $Q$ ) от времени воздействия плазменных потоков ( $P_{\text{генератора}} = 50$  кВт):  
1 – количество расплава золы; 2 – количество расплава отходов горючих сланцев

Представленные результаты позволяют определить количество образованного расплава в зависимости от времени воздействия на сырье плазменных потоков. Полученные данные свидетельствуют о достаточно высокой производительности по расплаву (около 24 кг/ч) при энергозатратах 2,1 кВт/кг.

Во время производства волокон к расплаву предъявляются четкие требования по температуре. Как известно, при выходе из летки плавильной печи струя расплава охлаждается, соответственно меняется ее температура, и ухудшаются условия формирования волокон.

В связи с этим следующим этапом данной работы явилось:

– разработка устройства, обеспечивающего дополнительный локальный нагрев истекающей из летки струи расплава путем пропускания по ней электрического тока с целью обеспечения од-

нородности по химическому составу, а также необходимых значе- ний температуры и вязкости для получения минерального волокна;

– проведение экспериментальных исследований по влиянию электрического тока на температуру струи расплава.

На рисунке 1 воронка 16 закреплена под леткой 5. Токопод- воды автономного, регулируемого источника питания постоянного тока 10 подключены к воронке 16 и устройству для раздува 17, что обеспечивает протекание тока по участку струи расплава между этими элементами за счет электропроводности расплавленного сырьевого материала. Использование такого комплекса позволяет осуществлять дополнительный подогрев расплава для обеспечения однородности расплава по химическому составу и требуемой вяз- кости. В таблице 3 приведены результаты изменения температуры в зависимости от электрической мощности, вкладываемой в струю силикатсодержащего расплава. Температура расплава в струе из- мерялась при помощи оптического пирометра 19 ОППИР-017Э.

Таблица 3 – Зависимость температуры в струе расплава от вклады- ваемой электрической мощности

№	$I$ , А	$U$ , В	Температура расплава в струе $T$ , °С
0	–	–	1650
1	45	160	1670
2	60	145	1720
3	75	140	1750
4	120	130	1790

\* Температура расплава при выходе из летки плавильной печи

**Четвертая глава (Физико-химические процессы проте- кающие при получении силикатных расплавов с использовани- ем энергии плазмы).** Определение особенностей поведения сили- катных систем с учетом их химического состава целесообразно про- водить с использованием диаграммы состояния и кривых плавкости, отражающих количество и состав жидкой фазы при изменении тем- пературы. Для предварительной оценки процесса плавления сырье- вых компонентов были построены кривые плавкости с использова- нием диаграммы состояния системы  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  (рисунок 4).

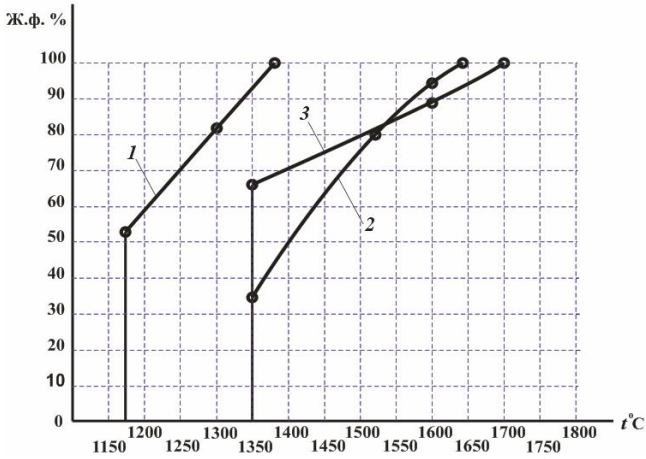


Рисунок 4 – Зависимость содержания жидкой фазы в сырьевых материалах от температуры:  
1 – базальт; 2 – зола; 3 – отходы горючих сланцев

Согласно данным, представленным на рисунке 4, можно сделать вывод о том, что температура начала образования расплава используемого сырья не превышает 1350 °C. Исследуемые отходы энергетических производств (зола, отходы горючих сланцев) характеризуются температурами плавления (1640–1700 °C), превышающими температуру плавления базальта (1380 °C) на 260–320 °C, что и определяет использование энергии низкотемпературной плазмы для получения расплава из техногенных отходов. Анализ показал, что отходы горючих сланцев характеризуются относительно большим количеством первичного расплава (66 %), однако получение 100 % расплава происходит лишь при температуре 1700 °C, в отличие от золы, у которой первичное образование расплава – 34 %, а полное расплавление наступает при температуре 1640 °C.

Анализ минералогического состава сырьевых материалов показал, что они сложены в основном кварцем, железисто-магнезиальными силикатами (пироксенами, оливинами), алюмосиликатами (плагиоклазами), стекловидным веществом. Кроме того, они содержат небольшие количества кальцита, магнетита и рудных минералов.

Результаты рентгенофазового анализа базальта, золы и отходов горючих сланцев, а также продуктов их плавления приведены на рисунках 5–7.

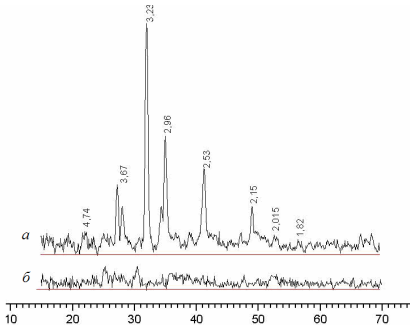


Рисунок 5 – Рентгенограммы:  
*a* – базальта; *б* – продукта плавления

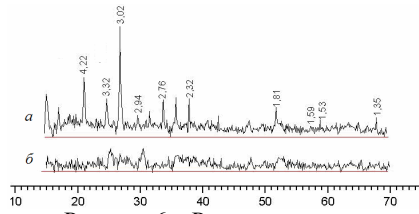


Рисунок 6 – Рентгенограммы:  
*a* – золы; *б* – продукта плавления

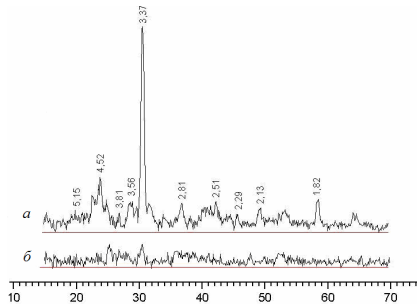


Рисунок 7 – Рентгенограммы:  
*a* – отходов горючих сланцев; *б* – продукта плавления

На рентгенограмме базальта (рисунок 5) выраженными являются дифракционные максимумы кварца ( $d = 4,74; 3,67; 1,82 \text{ \AA}$ ). Наряду с ними исследования выявили наличие алюмосиликатных соединений ( $d = 3,23; 2,96 \text{ \AA}$ ) и пироксенов ( $d = 2,53; 2,015 \text{ \AA}$ ).

Рентгенофазовый анализ золы показал (рисунок 6), что главные отражения рентгеновской дифракции соответствуют межплоскостным расстояниям, характерным для кварца ( $d = 3,32; 3,02; 2,76 \text{ \AA}$ ), алюмосиликатных анортитоподобных соединений ( $d = 2,94; 1,53 \text{ \AA}$ ), волластонитоподобных соединений ( $d = 1,81; 1,59; 1,35 \text{ \AA}$ ), а также для пироксенов ( $d = 4,22 \text{ \AA}$ ).

Отходы горючих сланцев (рисунок 7) характеризуются тем, что наряду с основными фазами кварца ( $d = 5,15; 4,52; 3,81; 1,82 \text{ \AA}$ ), характерными для всех материалов силикатной группы, присутствуют фазы

алюмосиликатных соединений ( $d = 3,37; 2,81; 2,51 \text{ \AA}$ ), а также волластонита ( $d = 3,56 \text{ \AA}$ ), диопсида ( $d = 2,29 \text{ \AA}$ ) и анортита ( $d = 2,13 \text{ \AA}$ ).

Рентгенофазовый анализ продуктов плавления всех сырьевых материалов показал, что они характеризуются отсутствием кристаллической структуры, т. е. являются рентгеноаморфными.

С целью выяснения внутри- и межмолекулярных взаимодействий, образования различных химических связей был проведен ИК-спектроскопический анализ.

В результате установлено, что основные полосы поглощения относятся к валентным колебаниям связи Si–O–Si. Остальные дискретные полосы поглощения – к колебаниям кремнекислородных тетраэдров, а также к колебаниям связи Al–O–Al. Наиболее упорядоченными являются материалы, полученные после плавления золы ТЭЦ, так как максимум полосы поглощения для валентного колебания связи  $1052,1 \text{ см}^{-1}$  наиболее приближен к аналогичному максимуму полосы поглощения для кварцевого стекла, представляющего собой наиболее упорядоченную полимерную структуру.

**Пятая глава (Технология получения минеральных волокон)** посвящена описанию технологии получения минеральных волокон из расплава силикатсодержащих материалов и анализу их свойств.

Однородный, по температуре и химическому составу, расплав, обладающий требуемой вязкостью, поступает в дутьевое устройство, где высокоскоростным турбулентным потоком воздуха перерабатывается в волокна. Изучение свойств волокон проводили по методикам, известным для стеклянных и других видов неорганических волокон. Основные технические характеристики волокон, полученных из расплавов базальта, золы и отходов горючих сланцев, представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики минеральных волокон

Свойства	Из базальта	Из золы	Из отходов горючих сланцев	Норма по ГОСТ 4640–93 (ВМ)
1. Модуль кислотности	4,2	12,5	19,8	Свыше 1,6
2. Водостойкость	1,2–2,5	2–4	5–7	Не более 7
3. Диаметр волокон, мкм	3–6	4–8	8–14	Не более 12
4. Содержание неволоконистых включений размером св. 0,25 мм, %	12–15	13–18	20–25	Не более 25
5. Длина волокон, мм	25–45	30–60	40–80	–

Минеральные волокна, полученные из исследованных сырьевых материалов путем плавления с помощью энергии плазмы с последующим раздувом расплава атмосферным воздухом, удовлетворяют требованиям нормативной документации для вида ВМ (таблица 4). Исключение составляет волокнистый материал из отходов горючих сланцев, диаметр волокон которого превышает норму, регламентированную ГОСТ 4640–93. Волокна, полученные из техногенных отходов, характеризуются повышенным модулем кислотности, который положительно влияет на химическую и термическую устойчивость волокон.

Моноволокна, полученные из расплавов золы и отходов горючих сланцев, при аналогичных параметрах выработки волокон отличаются по длине и диаметру, что связано с различным химическим составом сырья, а также вязкостью получаемого из него расплава (рисунок 8).



Рисунок 8 – Волокна, изготовленные с использованием струйной головки:  
1 – из золы; 2 – из отходов горючих сланцев (увеличение  $\times 300$ )

Для установления предела сохранения свойств волокнистого материала под действием высоких температур, а также для определения характерных температур процесса кристаллизации проведен дифференциально-термический анализ минеральных волокон, полученных из базальта и техногенных отходов (зола ТЭЦ, отходы горючих сланцев).

Исследуемое базальтовое волокно, полученное плазменным способом, можно использовать до температуры  $610\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Анализ кривых ДТА зольного волокна и волокон, полученных из отходов горю-

чих сланцев, показал, что начало деструкции происходит при температурах 710 и 740 °С соответственно. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что волокна, полученные из расплава отходов горючих сланцев, являются наиболее устойчивыми к воздействию высоких температур.

Таким образом, в результате проведенных исследований отходов энергетических производств с различным химическим и минералогическим составом установлена реальная возможность использования их в производстве минеральных волокон. Перспективным для выработки химически стойких волокон могут считаться золы и отходы горючих сланцев, обладающие повышенным модулем кислотности, при условии получения гомогенного расплава с высокой степенью химической однородности, что возможно на установках с использованием высококонцентрированных плазменных потоков.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1 Использование агрегатов для получения силикатных расплавов в условиях низкотемпературной плазмы позволяет изготавливать волокна из таких сырьевых материалов как зола и отходы горючих сланцев с повышенным модулем кислотности ( $M_k=12,5-19,8$ ) в сравнении с традиционными базальтовыми волокнами ( $M_k=4,2$ ).

2 Плавление исследуемых сырьевых материалов при удельных тепловых потоках ( $q=1,8-2,6 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>) и температуре (1800–2000 °С), соответствует условиям получения силикатного расплава на поверхности гарнисажного слоя.

3 Расплав гомогенизируется при мощности  $P=35,2-56$  кВт и удельных тепловых потоках  $q=1,8-2,6 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> плазменного генератора, что обеспечивает в дальнейшем формирование однородных минеральных волокон и малые удельные энергетические затраты при получении расплава (1,5–2,1 кВт/кг), что в 2–2,5 раза меньше, чем в существующих технологиях.

4 Отходы энергетических производств являются более тугоплавкими по сравнению с базальтом, температура плавления которого 1380 °С, температура плавления золы – 1640 °С, отходов горючих сланцев – 1700 °С.



5 В исследуемых продуктах плавления основным компонентом является стеклообразный материал, обогащенный оксидом кремния, открывающий условия для получения качественного волокна.

6 Разработано устройство дополнительного подогрева струи расплава на выходе из плавильной печи, путем пропускания через нее электрического тока, что позволяет получать однородный по химическому составу расплав.

7 Установка электроподогрева (Патент РФ 2344093), реализована на предприятии ООО «Черниговский базальт».

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

**в изданиях, входящих в перечень ВАК**

1 Шеремет М.А. Комплекс для получения силикатного расплава из золотходов / М.А. Шеремет, А.А. Никифоров, **О.Г. Волокитин** // Стекло и керамика. – 2007. – № 9. – С. 23–26.

2 Скрипникова Н.К. Электроплазменная установка получения минерального волокна из тугоплавких силикатсодержащих материалов/ Н.К. Скрипникова, А.А. Никифоров, **О.Г. Волокитин** // Стекло и керамика. – 2008. – №11. – С. 14–16.

3 Волокитин Г.Г. Высокотемпературные способы производства цементного клинкера с использованием низкотемпературной плазмы и электродугового прогрева (Джоулев нагрев)/ Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, **О.Г. Волокитин** // Вестник ТГАСУ. – 2008. – №4. – С. 106–112.

4 Никифоров А.А. Исследование плазменной технологии получения силикатных тугоплавких расплавов / А.А. Никифоров, Е.А. Маслов, Н.К. Скрипникова, **О.Г. Волокитин** // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. – №1, Том 16. – С. 159–163.

5 **Волокитин О.Г.** Физико-химические исследования материалов при получении минеральных волокон из техногенных отходов по плазменной технологии // Вестник ТГАСУ. – 2009. – №4. – С. 100–107.

6 Скрипникова Н.К. Процессы, протекающие при плазмохимическом синтезе тугоплавких силикатных материалов / Н.К. Скрипникова, В.И. Отмахов, **О.Г. Волокитин** // Стекло и керамика. – 2010. – №1. – С. 19–21.

**патент РФ**

7 Пат. 2344093 Российская Федерация. МПК<sup>51</sup> C03В 37/04. Установка для получения минеральных волокон / **Волокитин О.Г.**, Никифоров А.А., Скрипникова Н.К. – опубл. 20.01.2009, Бюл. № 2. – 5 с.

8 Пат. 2355651 Российская Федерация. МПК<sup>51</sup> C03В 37/04. Установка для получения минерального расплава плазменным нагревом / **Волокитин О.Г.**, Гайслер Е.В., Никифоров А.А., Скрипникова Н.К. – опубл. 20.05.2009, Бюл. № 14. – 8 с.

9 Пат. 2358929 Российская Федерация. МПК<sup>51</sup> C04В 7/42. Сырьевая смесь для получения портландцементного клинкера / Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Никифоров А.А., Дизендорф Т.Е., Позднякова Н.А., **Волокитин О.Г.** – опубл. 20.06.2009, Бюл. № 17. – 8 с.

**в общероссийских журналах**

10 **Волокитин О.Г.** Плазменно-дуговые устройства для получения минерального волокна / О.Г. Волокитин // Сборник научных трудов Лесотехнического института. – 2009. – № 4. – С. 126–128.

**в сборниках международных конференций**

11 Скрипникова Н.К. Процессы стеклообразования при воздействии высококонцентрированных потоков плазмы на силикатсодержащие материалы / Н.К. Скрипникова, **О.Г. Волокитин** // Материалы 10-ой международной конференции «GDPTTA». – Томск. – 2007.

12 Скрипникова Н.К. Изучение возможности получения минерального волокна из расплавов техногенных отходов углеобогащения / Н.К. Скрипникова, А.А. Никифоров, И.А. Лысак, **О.Г. Волокитин** // Материалы 10-ой международной конференции «GDPTTA». – Томск. 2007. – С 332–334.

13 Volokitin G.G. Plasma technology in building industry / G.G. Volokitin, N.K. Skripnikova, **O.G. Volokitin** // VI International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology». – Belarus. – 2009. – P. 618–620.

14 Волокитин Г.Г. Исследование воздействия электрического тока, протекающего по струе тугоплавкого силикатсодержащего расплава при получении минерального волокна / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, А.А. Никифоров, **О.Г. Волокитин** // Сборник трудов

Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Наноматериалы и технологии». – Бурятия. – 2008.

15 Волокитин Г.Г. Электрическая печь постоянного тока для плавления высокотемпературных неорганических силикатсодержащих материалов / Г.Г. Волокитин, А.А. Никифоров, **О.Г. Волокитин** // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Наноматериалы и технологии». – Бурятия. – 2008. – С. 94–97.

16 Бадеников А.В. Плазменные технологии получения минерального волокна из отходов энергетических производств / А.В. Бадеников, Н.К. Скрипникова, Г.Г. Волокитин, А.А. Никифоров, **О.Г. Волокитин** // Сборник трудов 2-й научно-практической конференции с международным участием «Наноматериалы и нанотехнологии. Наноразмерные структуры в физике конденсированного состояния. Технологии наноразмерных структур». – Бурятия. – 2009. – С. 167–169.

#### **в сборниках всероссийских конференций**

17 **Волокитин О.Г.** Экспериментальная установка получения расплава для производства минерального волокна с использованием комбинированного источника тепла / О.Г. Волокитин // Труды VII Всероссийского студенческого научно-технического семинара Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность. – Томск. – 2006. – С. 237–239.

18 **Волокитин О.Г.** Электропривод подачи электродов печи для переработки золоотходов / О.Г. Волокитин // Труды VI Региональной научно-практической студенческой конференции. Электротехника, электромеханика и электротехнологии. – Томск, 2006. – С. 63–65.

19 **Волокитин О.Г.** Получение минерального волокна из расплавов тугоплавких силикатных материалов / О.Г. Волокитин // Актуальные проблемы строительной отрасли: Тезисы 65 Всероссийской научно-технической конференции: сб. статей. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин). – 2008. – 38 с.

20 Скрипникова Н.К. Изучение возможности получения минерального волокна из расплавов техногенных отходов углеобогащения / Н.К. Скрипникова, А.А. Никифоров, И.А. Лысак, **О.Г. Волокитин** // VII Всероссийская научно-практическая конференция

«Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья». – Белокуриха. – 2007. – С. 67–69.

21 Никифоров А.А. Получение минерального волокна из тугоплавких силикатсодержащих материалов / А.А. Никифоров, **О.Г. Волокитин** // VIII Всероссийская научно-практическая конференция «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья». – Белокуриха. – 2008.

22 Волокитин Г.Г. Технологические режимы плазменного устройства для получения расплава из тугоплавких силикатсодержащих материалов / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, О.Г. Волокитин // III Всероссийская конференция «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине». – Новосибирск. – 2009. – 37 с.

23 Скрипникова Н.К. Получение минерального волокна из тугоплавких силикатсодержащих материалов / Н.К. Скрипникова, Волокитин Г.Г., А.А. Никифоров, **О.Г. Волокитин** // IX Всероссийская научно-практическая конференция «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья». – Белокуриха. – 2009. – С. 47–50.

Подписано в печать 05.05.2010 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 1,1. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 199

Изд-во ГОУ ВПО «ТГАСУ», 634003, г.Томск, пл. Соляная, 2.

Отпечатано с оригинал-макета автора в ООП ГОУ ВПО «ТГАСУ».

634003, г.Томск, ул. Партизанская, 15.