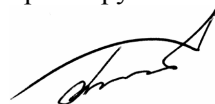


На правах рукописи



**Волокитин Олег Геннадьевич**

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПОЛУЧЕНИЯ  
СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ И МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ  
В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

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

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Томском государственном архитектурно-строительном университете и федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

**Научный консультант:**

доктор технических наук, профессор, Скрипникова Нелли Карповна

**Официальные оппоненты:**

Будовских Евгений Александрович, доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный индустриальный университет, кафедра физики имени профессора В.М. Финкеля, профессор, г. Новокузнецк

Сандитов Дамба Сангадиевич, доктор физико-математических наук, профессор, Бурятский государственный университет, кафедра «Общая Физика», профессор, г. Улан-Удэ

Струнин Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, кафедра экспериментальной физики и радиофизики, заведующий кафедрой

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

Защита состоится «19» октября 2016 г. в 16 ч 30 мин на заседании диссертационного совета Д 212.269.02 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Савиных, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55, и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/909/worklist>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук \_\_\_\_\_ М.В. Коровкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность проблемы**

В настоящее время получение однородного по температуре и составу силикатного расплава из сырьевых материалов, имеющих температуру плавления более 1500 °С, с использованием традиционных технологий не представляется возможным. Использование энергии низкотемпературной плазмы дает возможность в сотни раз увеличить скорость нагрева силикатных смесей и добиться стабильно высоких температур 3000–3500 °С при получении силикатных расплавов из сырья с температурой плавления 1500 °С и более. Актуальной является разработка способов получения силикатных расплавов с использованием энергии низкотемпературной плазмы. При этом процесс плавления силикатных смесей позволит значительно снизить энергетические затраты и вредные выбросы в атмосферу. В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы расширения сырьевой базы для получения строительных материалов силикатной группы за счет использования распространенного природного сырья и техногенных отходов, в том числе некондиционных, для стекловарения. Системное решение научных и практических задач, связанных с получением расплавов для создания силикатных материалов различного назначения, установлением режимов работы генератора низкотемпературной плазмы, обеспечивающих получение высокотемпературных силикатных расплавов из сырья с различным содержанием оксида кремния и достижением необходимой однородности конечного продукта, является определяющим в решении рассматриваемой проблемы.

### **Степень разработанности темы диссертационного исследования**

Значительный вклад в исследование низкотемпературной плазмы внесли научные коллективы под руководством М.Ф. Жукова, Н.Н. Рыкалина,

Л.С. Полака. Способствовали развитию плазменных технологий в области разработки и создания генераторов низкотемпературной плазмы исследования ученых Института теплофизики СО РАН под руководством А.С. Аньшакова. Широко известны результаты исследований В.С. Бессмертного, связанные с разработкой технологий и изучением процессов взаимодействия плазмы с силикатными материалами. Взаимодействие электронных и ионных пучков с конденсированными средами, неравновесные плазмохимические процессы подробно описаны в работах А.П. Суржикова, Г.Е. Ремнева, В.И. Отмахова. Однако на сегодняшний день отсутствуют результаты системных исследований использования низкотемпературной плазмы при получении силикатных расплавов в строительной отрасли, что и обуславливает актуальность данной работы.

Работы, положенные в основу диссертации, выполнялись в рамках государственных научных и научно-технических программ: грант Президента РФ (МК 2330.2013.8), гранты Российского фонда фундаментальных исследований (№ 11-08-90702-моб\_ст, 12-08-90705-моб\_ст, 13-08-90718 мол\_нр\_рф, 14-38-50031 мол\_нр, 15-38-50326 мол\_нр, 16-38-50020 мол\_нр, 16-48-700656 р\_а), стипендия Президента РФ (СП-211.2015.1), в рамках государственного задания Минобрнауки по базовой части – № 920, по проектной части – № 11.351.2014/К.

**Объекты исследования** – сырьевые материалы с содержанием оксида кремния от 50 до 100 % (базальтовые породы, золошлаковые отходы тепловых электростанций, золы после сжигания горючих сланцев, кварц-полевошпатсодержащие материалы, кварцевые пески), продукты их плавления и материалы на их основе.

**Предмет исследования** – физические процессы получения силикатных расплавов, протекающие при воздействии низкотемпературной плазмы на силикатсодержащие материалы с содержанием оксида кремния от 50 до 100 %.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

**Цель работы** – установление физических закономерностей получения силикатных расплавов из сырья с содержанием оксида кремния 50–100 % в низкотемпературной плазме и материалов на их основе.

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

1. Исследование процессов теплопереноса при плавлении дисперсных силикатов в условиях низкотемпературной плазмы.

2. Проведение расчетов по определению времени плавления частицы кварца в зависимости от ее размера в потоке низкотемпературной плазмы и в силикатном расплаве.

3. Разработка конструкции агрегатов низкотемпературной плазмы для получения высокотемпературных силикатных расплавов и установление теплофизических и электрофизических характеристик плазменного генератора.

4. Определение температурных режимов плазменного воздействия на силикатные материалы и разработка плазменного реактора для получения высокотемпературных силикатных расплавов.

5. Исследование физических и физико-химических процессов получения силикатных расплавов при плавлении в плазмохимическом реакторе.

6. Проведение сравнительного анализа равновесных и неравновесных процессов при образовании расплава силикатных смесей с различным содержанием оксида кремния.

7. Разработка общих положений технологии получения силикатных расплавов из сырья с содержанием оксида кремния 50–100 % в условиях низкотемпературной плазмы.

8. Исследование структуры и свойств материалов на основе силикатных расплавов, полученных с использованием энергии низкотемпературной плазмы.

9. Практическая реализация научных результатов применения низкотемпературной плазмы в технологии получения силикатных расплавов и материалов на их основе.

**Научная новизна** заключается в установлении закономерностей образования силикатных расплавов с содержанием оксида кремния от 50 до 100 % с использованием низкотемпературной плазмы, обеспечивающих создание новых технологий получения силикатных материалов различного назначения.

1. Впервые установлено, что формирование рециркуляционной зоны в плазмохимическом реакторе при плавлении силикатов с различным содержанием оксида кремния обеспечивает полное расплавление исходных частиц.

2. Впервые установлено, что плавление силикатных частиц размером 1–2 мм в условиях низкотемпературной плазмы (3000–3500 °С) осуществляется за 2–3 секунды, при этом процессы испарения оксидов не успевают развиться, а удельные тепловые потоки  $q = 1,0–2,0 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> обеспечивают однородность расплава.

3. Установлено, что процесс получения силикатного расплава в условиях низкотемпературной плазмы (скорость нагрева более 1000 °С в секунду) происходит при одновременном плавлении всех компонентов (температура 1800–2000 °С) и гомогенизации расплава (температура более 2000 °С) в отличие от процесса образования расплава при скоростях нагрева 0,5–1 °С в секунду, протекающего с образованием эвтектических расплавов и растворением в них тугоплавких компонентов.

4. Установлено, что в условиях низкотемпературной плазмы происходит перегрев расплава относительно температуры плавления более чем на  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что приводит к снижению вязкости расплава до значения менее  $10\text{ Па}\cdot\text{с}$  и его гомогенизацию, при этом обеспечивается стабильность свойств материалов из получаемых расплавов.

5. Установлено, что при плавлении кварца в низкотемпературной плазме в условиях перегрева расплава более чем на  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходит изменение его структуры не только в дальнем порядке, но и в ближнем, что приводит к изменению координат атомов и смещению основной полосы поглощения в ИК-спектре продукта плавления с  $1087,2$  до  $1105,4\text{ см}^{-1}$ .

6. Установлено, что плавление многокомпонентных силикатных смесей в равновесных условиях протекает в два этапа. На первом этапе происходит образование расплава за счет последовательного плавления бинарных и тройных эвтектик (температуры  $1170\text{--}1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). На втором этапе происходит растворение тугоплавких компонентов в образующемся расплаве (температуры  $1350\text{--}1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Это положено в основу методики расчета кривых плавкости многокомпонентных систем.

7. Сверхвысокие скорости нагрева сырьевых материалов (более  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  в секунду) до температуры  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  позволяют применять ранее неиспользуемое природное и техногенное сырье при получении силикатных расплавов и материалов на их основе. При этом происходит сокращение времени образования расплава и уменьшение удельных энергозатрат в  $1,5\text{--}1,8$  раза.

### **Теоретическая значимость работы**

Развиты представления о переходе твердофазовых силикатов с различным содержанием кремнезема в расплавленное состояние при сверхвысоких скоростях нагрева в условиях низкотемпературной плазмы.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработаны основные положения технологии получения силикатных расплавов с содержанием оксида кремния от 50 до 100 % с использованием низкотемпературной плазмы для создания материалов различного назначения, что подтверждено 4 патентами на изобретения.

2. Предложена модель плазменного воздействия, отражающая плавление силикатных частиц размером 1–2 мм за время 2–3 секунды, что положено в основу разработок конструкций электроплазменных установок.

3. Предложена конструкция плазменного реактора для получения расплава с вязкостью более  $10^5$  Па·с, в которой предусмотрено получение высоковязких расплавов для последующего наплавления продукта без его слива.

4. Предложены и внедрены технологические и температурные режимы плазменного воздействия на силикатные материалы с целью получения силикатных расплавов и материалов на их основе, что подтверждено актами внедрения результатов научных исследований.

### **Методология и методы диссертационного исследования**

Включает теплофизические расчеты взаимодействия высококонцентрированных потоков плазмы с силикатными частицами для установления зависимости времени полного расплавления частицы от ее размера; исследование физических процессов перехода твердых силикатов в расплавленное состояние; разработку конструкций электроплазменных установок для получения силикатных расплавов и материалов на их основе.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Образование гомогенных силикатных расплавов в низкотемпературной плазме обеспечивается скоростью нагрева силикатов более  $1000$  °С в секунду, перегревом расплава на  $300$  °С при размере исходных частиц 1–2 мм и временем их нахождения в плазмохимическом реакторе в течение 2–3 секунд.



2. Процесс образования расплава в условиях низкотемпературной плазмы заключается в одновременном плавлении всех компонентов смеси с образованием гетерогенного расплава и его гомогенизацией при вязкости менее  $10^5$  Па·с за счет перегрева, что приводит к сокращению времени получения расплава при уменьшении удельных энергозатрат в 1,5–1,8 раза.

3. Формирование рециркуляционной зоны в плазмохимическом реакторе при плавлении силикатных материалов с содержанием оксида кремния 50–100 % обеспечивает время прогрева частиц (2–3 секунды) до их полного плавления.

4. Технологические особенности получения однородных силикатных расплавов с использованием низкотемпературной плазмы заключаются в подготовке дисперсной шихты (1–2 мм) и ее дозированной подачи в плазмохимический реактор, реализующий температуры 3000–3500 °С при удельных тепловых потоках  $q = 1,0–2,0 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

**Достоверность научных положений и выводов** обеспечена применением комплекса взаимодополняющих методик, адекватных цели и задачам исследования, получением обширного фактического материала и его разно-сторонним анализом, применением современных методов исследования и статистической обработки полученных данных.

### **Апробация работы**

Материалы диссертации представлены на конференциях регионального, всероссийского и международного уровня: Всероссийской научно-практической конференции «Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья» (Белокуриха, 2010, 2012, 2014); Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (Алушта, 2010, 2012, 2013, 2014); на Китайско-Российском семинаре «Creating of nano-structural materials with the low-temperature plasma

application» (Da lian, China, 2010); Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы-2011» (Петрозаводск, 2011); Symposium on Plasma Physics and Technology (Czech Republic, 2011, 2012); 3rd International Congress on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, High Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (Томск, 2012); Всероссийской научной конференции с международным участием «Наноматериалы и технологии: Наноструктурированные системы в физике конденсированного состояния. Техника и технология наноматериалов» (Улан-Удэ, 2012, 2016); VII International Conference Plasma Physics and Plasma Technology (Minsk, 2012); на Международной конференции «Плазменные технологии исследования, модификации и получения материалов различной физической природы» (Казань, 2012).

### **Публикации**

Материалы диссертации опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, в профильных международных журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science. В частности, основные результаты диссертации представлены в 45 научных публикациях, в том числе это 3 монографии, 4 патента РФ и 38 статей в рецензируемых изданиях.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения и шести глав, основных выводов по работе, списка использованной литературы из 252 наименований. Работа изложена на 288 страницах, включая 94 рисунка, 55 таблиц, 2 приложения.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы их цель и основные задачи, отражена научная новизна и практическая значимость результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена анализу текущего состояния, существующих особенностей, проблем и недостатков современной теории и практической реализации процессов получения силикатных расплавов с использованием высокоэнергетических источников нагрева, изучению результатов исследований научных коллективов под руководством М.Ф. Жукова, В.С. Бесмертного, Ю.М. Гришина, О.С. Татаринцевой, обоснованию, формулировке цели и задач, поставленных в диссертационной работе. Отражены особенности получения высокотемпературных силикатных расплавов, рассмотрены высокоэнергетические источники нагрева, используемые для получения силикатных расплавов, проанализированы физико-химические процессы, протекающие при взаимодействии высококонцентрированных потоков плазмы с твердым телом. Анализ работ по данной тематике позволил сделать вывод об отсутствии результатов системных исследований использования низкотемпературной плазмы при получении силикатных расплавов, что подтверждает актуальность исследований в данном направлении.

**Во второй главе** в качестве исходных материалов для получения расплавов были выбраны материалы с различным содержанием оксида кремния, их выбор обусловлен содержанием в химическом составе кремнезема от 50 до 100 % и пригодностью для практического использования. В таблице 1 представлен химический состав основных сырьевых материалов, исследуемых в работе. К материалам природного происхождения относятся базальтовая

порода, кварц-полевошпатсодержащее сырье и кварцевый песок. В качестве техногенного сырья использовались золы и продукты сжигания сланцев.

Таблица 1 – Химический состав сырьевых компонентов

Сырьевые материалы	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O	$\Delta m_{np}$
Базальтовая порода	50,40	16,17	7,24	8,98	4,37	8,14	4,70
Зола ТЭЦ	51,16	35,07	3,62	8,33	0,91	0,23	0,68
Продукты сжигания сланцев	61,59	23,36	7,91	1,60	1,27	1,34	2,93
Кварц-полевошпатсодержащее сырье	62,05	15,94	4,18	4,72	2,01	8,4	2,7
Кварцевый песок Туганского месторождения	98,15	0,67	0,12	0,07	0,05	0,01	0,93
Кварц Чупинского месторождения	99,96	следы	–	следы	следы	0,03	–

Приведена и обоснована структурно-методологическая схема получения силикатных расплавов с различным содержанием SiO<sub>2</sub> и продуктов их плавления с описанием используемых методов исследования и используемого оборудования.

**В третьей главе** представлены теоретические расчеты и моделирование процессов плавления силикатсодержащих материалов: расчет времени плавления частицы кварца в условиях низкотемпературной плазмы; расчет времени плавления частицы кварца при попадании ее в высокотемпературный силикатный расплав; распределение температурных полей при получении силикатных расплавов в плазмохимическом реакторе.

Для определения границ дисперсности порошка, подаваемого в плазменный реактор, проведен расчет времени плавления частиц кварца радиусом

от 0,001 до 1 мм при нахождении их в потоке низкотемпературной плазмы и при попадании в силикатный расплав. Аналитическое решение поставленной задачи сводится к тому, что при нагреве частицы кварца до температуры плавления изменение температуры происходит только за счет электрического нагрева и теплообмена с окружающей средой.

$$c_{ch}\rho_{ch}V_{ch}\frac{dT_{ch}}{dt} = \alpha S_{ch}(T_{sr} - T_{ch}) + Q_{el},$$

где  $t$  – время;  $T$  – температура;  $c$  – удельная теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена;  $S_{ch}$  – площадь поверхности частицы;  $V_{ch}$  – объем частицы;  $Q_{el}$  – теплоприход от электрического нагрева.

На первом этапе плавление частицы кварца происходит в потоке низкотемпературной плазмы, представляющем собой цилиндрическую трубку радиусом  $r$ , протяженностью  $L$  (рисунок 1). Из плазмотрона со стационарной объемной скоростью  $W$  выходят потоки плазмы, которые прогревают частицы до температуры плавления, а после расплавления нагревают получившийся расплав до стационарной температуры. После заполнения объема установки расплавом частицы кварца попадают сразу в расплав и нагреваются за счет теплообмена с расплавом. При расчетах времени плавления частиц в условиях низкотемпературной плазмы целью являлось определение возможности расплавления частицы кварца за время движения до дна установки (высота падения частиц  $h \sim 100$  мм). Качественный вид изменения температуры частицы во времени от момента начала нагрева до момента полного расплавления для  $r = 1$  мм представлен на рисунке 2.

Расчеты показали, что при скорости подачи частиц  $W = 0,65$  л/с полностью расплавляются частицы размером 1,28 мм. Расчеты для  $W = 1,4$  л/с показали возможность полного расплавления частиц размером 0,88 мм до попадания на дно установки, частицы большего размера успевают расплавиться частично.

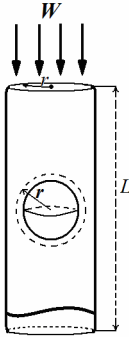


Рисунок 1 – Схема плазменного воздействия

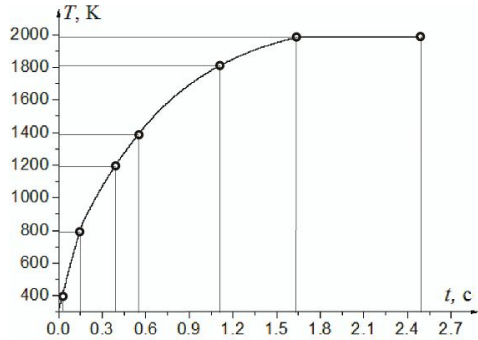


Рисунок 2 – Изменение температуры частицы во времени,  $r = 1$  мм

После заполнения установки высокотемпературным силикатным расплавом подаваемые в плавильную печь частицы кварца сразу попадают в расплав. Проведенные расчеты позволили установить зависимость времени полного расплавления частицы кварца, находящейся в высокотемпературном силикатном расплаве, от ее радиуса. Результаты расчета также представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость времени плавления  $t$  от радиуса частицы, находящейся в силикатном расплаве

Размер частиц, мм	0,002	0,004	0,02	0,04	0,2	0,4	2
$t$ , с	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	0,1	2,61

Выделение джоулева тепла при прохождении электрического тока происходит в расплаве (в жидкой фазе). Расчетами установлено, что электрический ток слабо влияет на скорость разогрева частиц до температуры плавления. Однако после начала плавления расплавленный слой вокруг кристаллической частицы быстро догревается до средней температуры расплава за счет электрического тока и в связи с этим ускоряет процесс плавления.

На рисунке 3 представлена динамика развития температурных полей в анализируемом объекте. В начальный момент времени ( $t = 5$  с) в области входного отверстия формируется температурный фронт, обусловленный

введением в полость печи высоковязкой среды с температурой ниже начальной температуры анализируемого объекта. В результате формирования температурного градиента в зоне входного сечения зарождается рециркуляционное течение, препятствующее непосредственному выходу материала в центральную часть полости. Образование рециркуляционной зоны вблизи входного отверстия естественным образом приводит к необходимости продвижения материала сначала к основанию плавильной печи, а оттуда, в соответствии с рассчитанными линиями тока, вдоль правой стенки полости к выходному отверстию.

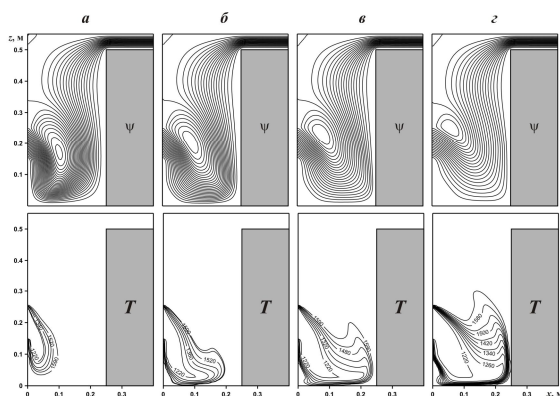


Рисунок 3 – Изолинии функции тока  $\psi$  и температуры  $T$ :  
 $a - t = 5$  с,  $б - t = 10$  с,  $в - t = 15$  с,  $г - t = 20$  с

Такая траектория движения расплава представляется наиболее оптимальной в отношении роста времени прогрева материала и не требует дополнительного изменения конфигурации плавильной печи. Таким образом, формирование рециркуляционной зоны в плазмохимическом реакторе при плавлении силикатных материалов с содержанием оксида кремния 50–100 % обеспечивает время прогрева частиц (2–3 секунды) до их полного плавления.

**В четвертой главе** приведены результаты физико-химических исследований сырьевых материалов и продуктов их плавления. В рамках концепции

изучения процессов плавления силикатных сырьевых материалов, содержащих в своем составе оксид кремния 50–100 %, проведен анализ и сравнение равновесных и неравновесных процессов образования расплава силикатных смесей с различным содержанием  $\text{SiO}_2$ . Плавление с помощью высококонцентрированных потоков плазмы является высокотехнологичным процессом, обеспечивающим переработку как техногенного, так и природного сырья. Применение энергии низкотемпературной плазмы для получения высокотемпературных силикатных расплавов связано с реализацией плазменным генератором высоких температур, значительно превышающих температуры плавления всех силикатных материалов. При этом создаются стабильно высокие температуры и высокая концентрация энергии, позволяющие переводить перерабатываемые материалы в расплавленное состояние.

Предварительной оценкой процессов, протекающих при высокотемпературном воздействии на силикатные системы, является проведение фазового анализа по диаграммам состояний. Анализ кривых плавкости сырьевых материалов с учетом фактического химического состава позволил установить температуру и количество образованного при плавлении первичного расплава, а также температуру получения 100%-го расплава (таблица 3).

Таблица 3 – Изменение количества расплава при плавлении сырьевых материалов с учетом химического состава

Сырьевые материалы	Температура образования первичного расплава, °С	Количество первичного расплава, %	Температура образования 100%-го расплава, °С
Базальт	1170	35,92	1370
Зола	1170	33,33	1590
Продукт сжигания сланцев	1170	6,4	1600
Кварц-полевошпатсодержащее сырье	710	20,8	1400
Кварцевый песок	1170	1,8	1610



Разница в температурах образования первичного расплава определяется химическим составом сырья, наличием щелочных оксидов и оксидов металлов. Кривые плавкости реальных систем характеризуются более низкими температурами образования расплава по сравнению с модельными. Высокие температуры, реализуемые генератором плазмы, создают условия одновременного плавления всех фаз смеси и обеспечивают образование в локальных областях гетерогенного расплава. Скорость гомогенизации определяется низкой вязкостью расплавов при температурах 3000–3500 °С.

Проведенный ИК-спектроскопический анализ всех исследуемых продуктов плавления, полученных из силикатсодержащих материалов с содержанием оксида кремния 50–100 % с использованием энергии низкотемпературной плазмы, позволил обобщить научные данные о процессах взаимодействия высококонцентрированных тепловых потоков плазмы с силикатным сырьем, а также выявить особенности процессов, протекающих при плазмохимическом плавлении исследуемых материалов (рисунок 4, таблица 4).

Основные дискретные полосы поглощения относятся к деформационным колебаниям связи Si–O–Si, к колебаниям кремнекислородных тетраэдров, а также к колебаниям связи Al–O–Al для различных форм Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, находящихся в различных полиморфных модификациях. По характеру связей ИК-спектры следует отнести к алюмосиликатным стеклам с разной степенью упорядоченности полимерной каркасной сетки.

Наиболее упорядоченными являются материалы, полученные из кварцевого песка, так как максимум полосы поглощения для валентного колебания связи 1105,4 см<sup>-1</sup> наиболее приближен к аналогичному максимуму полосы поглощения для кварцевого стекла, представляющего собой наиболее упорядоченную полимерную структуру.

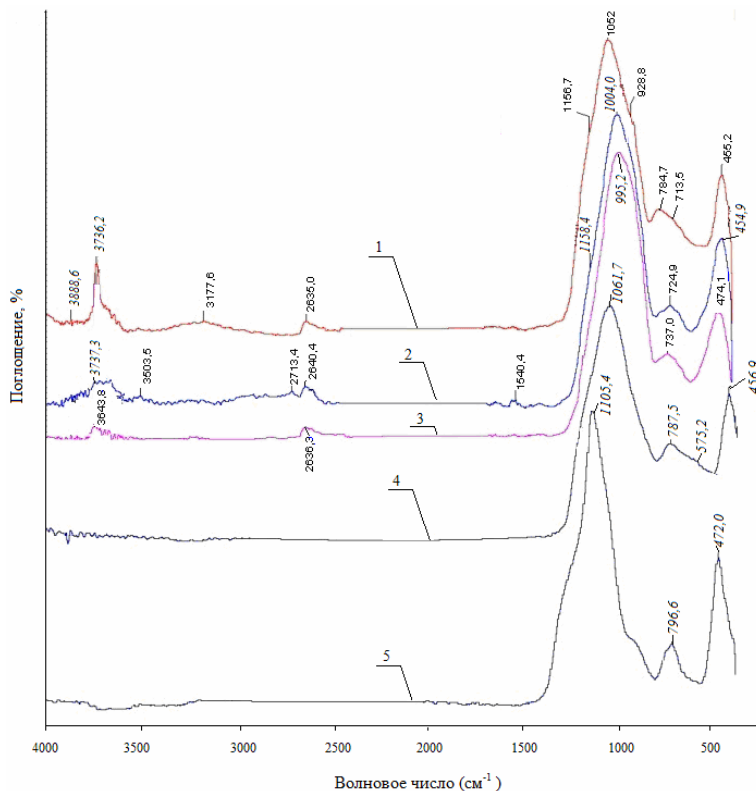


Рисунок 4 – ИК-спектры поглощения стекол, полученных из:  
 1 – золы ТЭЦ; 2 – продукта сжигания горючих сланцев;  
 3 – базальта; 4 – кварц-полевошпатсодержащего сырья;  
 5 – кварцевого песка Туганского месторождения

Таблица 4 – Основные полосы поглощения ИК-спектров стекол

Полосы поглощения	Волновое число, см <sup>-1</sup>				
	Базальт SiO <sub>2</sub> ~50 %	Продукты сжигания сланцев SiO <sub>2</sub> ~61 %	Зола SiO <sub>2</sub> ~51 %	Кварц- полевошпатсодержащее сырье SiO <sub>2</sub> ~62 %	Кварцевый песок SiO <sub>2</sub> ~99 %
Al-O-Al	474,1	454,9	455,2	456,9	472,0
Al-O-Al	–	–	–	575,2	–
Si-O-Si	737,0	724,9	713,5	–	–
Si-O-Si	–	–	784,7	787,5	796,6
Al-O-Al	–	–	928,8	–	–
Si-O-Si	995,2	1004,0	1052,0	1061,7	1105,4

Проведенные исследования позволили с высокой степенью достоверности определить относительное содержание фаз в кварцевом песке и в продукте его плавления, а также координаты атомов кислорода и кремния, необходимых для дальнейшего исследования изменений структуры продукта плавления, полученного в плазмохимическом реакторе. Результаты количественного фазового состава кварцевого песка свидетельствуют о том, что плазмохимическое воздействие оказывает существенное влияние на его структурное состояние.

На основании сделанных выводов сформированы обобщенные модели процессов, протекающих при скоростях нагрева  $0,5-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  в секунду и при быстром нагреве в условиях низкотемпературной плазмы (рисунки 5, 6).

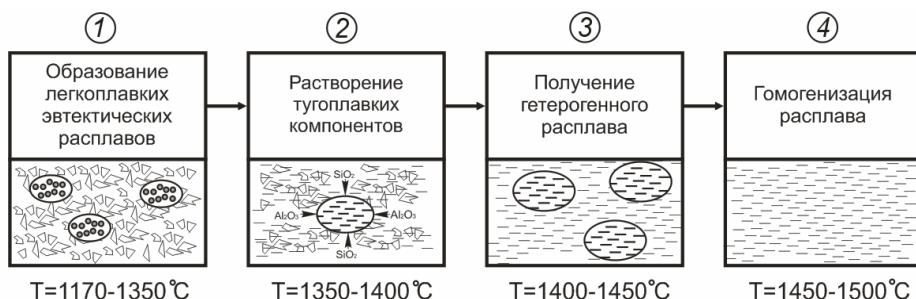


Рисунок 5 – Схема процессов плавления силикатных смесей при скоростях нагрева  $0,5-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  в секунду

Процесс получения расплава при скоростях нагрева  $0,5-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  в секунду происходит в следующей последовательности: образование первичного расплава эвтектик и их плавление; образование расплава за счет растворения тугоплавких компонентов; образование гетерогенного расплава; выравнивание химического состава расплава и его гомогенизация.

Процесс образования расплава в условиях низкотемпературной плазмы отличается отсутствием отдельных этапов образования первичного эвтектического расплава и растворения тугоплавких компонентов в расплаве.

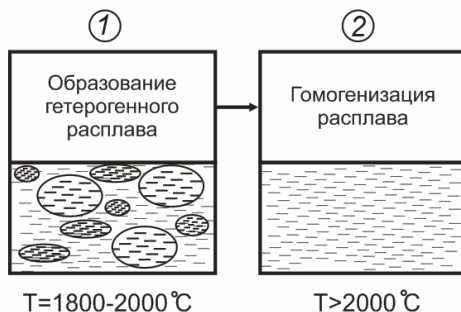


Рисунок 6 – Схема неравновесных процессов плавления силикатных смесей в условиях низкотемпературной плазмы

Стадии образования эвтектического расплава и растворения оксидов в расплаве устраняются при быстром нагреве. Эти процессы за счет быстрого нагрева смеси протекают одновременно с процессом образования гетерогенного расплава, который в итоге перемешивается, образуя гомогенный силикатный расплав за счет понижения вязкости.

**В пятой главе** на основании результатов теоретических расчетов и установленных режимов теплопереноса при плавлении силикатного сырья с использованием энергии низкотемпературной плазмы показаны отдельные преимущества электроплазменных установок в сравнении с традиционно используемыми при переработке силикатных материалов в расплав. Базируясь на анализе конструкций плавильных печей, традиционно используемых при получении силикатных расплавов, многолетнем опыте по оптимизации параметров и конструкции плазмохимических реакторов, предложены варианты плазменных комплексов для получения химически однородных силикатных расплавов.

Предварительно были установлены рабочие режимы плазменного генератора и теплофизические параметры дугового разряда (таблица 5).

Таблица 5 – Рабочие режимы и теплофизические параметры плазмотрона

№ режимов	Мощность плазмотрона, кВт	Сила тока, А	Напряжение, В	Удельный тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup>
1	24	140	170	$1,0 \cdot 10^6$
2	38	230	165	$1,8 \cdot 10^6$
3	58	400	145	$2,6 \cdot 10^6$

Экспериментально установлено, что рабочие режимы электроплазменной установки позволяют достичь удельных тепловых потоков  $1,0\text{--}2,6 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, достаточных для получения расплава с необходимой температурой и вязкостью.

На следующем этапе были проведены экспериментальные исследования по подбору системы подачи сырьевого материала в область горения плазменной дуги. Установлено, что система воздушно-дисперсной подачи сырья не вполне эффективна, при такой системе значительная часть сырьевого материала выдувается высококонцентрированными потоками плазмы из области горения плазменной дуги и расплавляется частично вследствие малого времени взаимодействия с потоками плазмы, в результате чего снижается качество получаемого силикатного расплава. В результате анализа работы созданных плазменных установок, с учетом их особенностей и недостатков был разработан экспериментальный плазмохимический реактор (Патент РФ 2503628) для получения силикатных расплавов (рисунок 7).

Корпус плавильной печи 3 выполнен из нержавеющей стали в виде водоохлаждаемого цилиндра, внутрь которого помещен графитовый тигель 4. Сливной желоб 2 расположен в верхней части плавильной печи. Устройство для подачи порошкообразного сырья закреплено на противоположной сливному желобу боковой поверхности корпуса плавильной печи и выполнено в виде шнекового питателя 5.

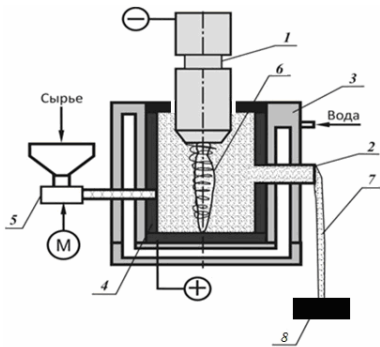


Рисунок 7 – Схема экспериментальной плазменной установки для получения высокотемпературных силикатных расплавов:

- 1 – плазматрон; 2 – сливной желоб; 3 – водоохлаждаемая плавильная печь;  
 4 – графитовый тигель; 5 – шнековый питатель; 6 – плазменная дуга;  
 7 – силикатный расплав; 8 – устройство для сбора расплава

Это обеспечивает введение сырья не сверху на поверхность расплава, а с боковой части корпуса плавильной печи и непосредственно в область расплава, исключая выдувание мелкодисперсных частиц потоком низкотемпературной плазмы. Все это позволяет поддерживать однородность и низкую вязкость расплава по всему объему печи. После того, как расплав достигает уровня сливного желоба 2, поток силикатного расплава, переливаясь через его край, поступает к устройству сбора расплава 8.

Проведенные экспериментальные исследования показывают преимущества электроплазменного способа плавления при получении силикатных расплавов, так как повышение температуры, значительно сокращая общее время процесса плавления, обеспечивает высокую химическую однородность расплава и, как следствие, открывает возможности получения таких востребованных строительных материалов, как минеральное волокно, стеклокристаллические материалы, кварцевое стекло и др. Кроме того, разработана экспериментальная плазменная установка по плавлению мелкодис-

персного однокомпонентного полифазного сырьевого материала с замкнутым объемом, отличающаяся принципиально новой схемой подачи исходного сырья и отсутствием сливного желоба (рисунок 8).

Экспериментально установлено, что на основе исследуемого сырьевого материала с содержанием  $\text{SiO}_2$  более 62 %, подтверждается возможность получения продукта с высокой степенью аморфности с применением низкотемпературной плазмы. Такая схема используется при получении высоковязких расплавов со значениями вязкости более  $10^5$  Па·с для последовательного наплавления продукта без его слива.

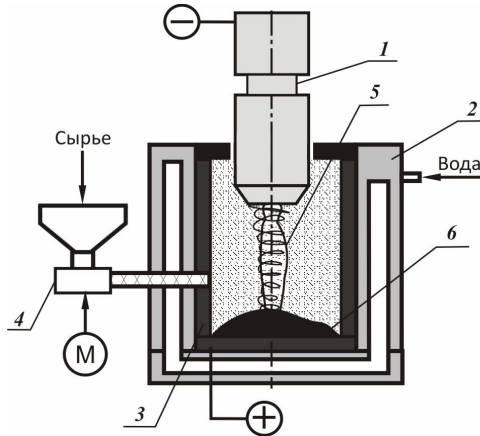


Рисунок 8 – Схема экспериментальной плазменной установки для получения высокотемпературных силикатных расплавов:

- 1 – плазмотрон; 2 – водоохлаждаемая плавильная печь;
- 3 – графитовый тигель; 4 – шнековый питатель; 5 – плазменная дуга;
- 6 – продукт плавления

При определении производительности описанной установки немаловажным является установление параметров работы шнекового питателя. В специальном градуировочном эксперименте была определена скорость подачи сырья в зависимости от числа оборотов вала шнекового питателя (рисунок 9).

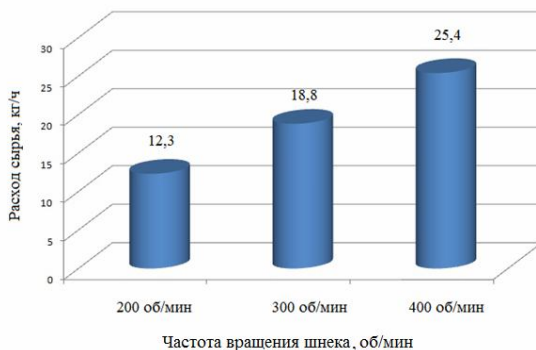


Рисунок 9 – Производительность шнекового дозатора при различном числе оборотов вала электродвигателя

Установлено, что производительность используемого шнекового питателя регулируется в пределах от 12,3 кг/ч до 25,4 кг/ч.

**В шестой главе** описаны реализованные и перспективные технологии обработки и создания новых материалов (рисунок 10).

Использование энергии низкотемпературной плазмы при термической обработке поверхности силикатных кирпичей, бетонов и обжиговых материалов позволяет создавать защитно-декоративное покрытие.



Рисунок 10 – Реализованные и перспективные плазменные технологии



Улучшаются физико-механические характеристики и декоративные свойства обработанных изделий. Применение низкотемпературной плазмы позволяет модифицировать поверхность и получить стекловидное покрытие, которое улучшает эксплуатационные свойства изделий и их долговечность (рисунок 11).

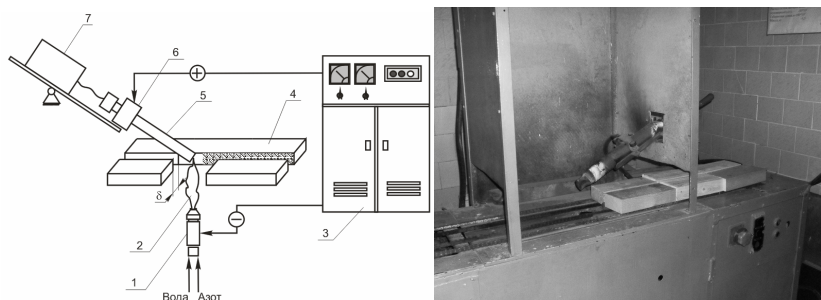


Рисунок 11 – Комплекс оборудования для создания защитно-декоративного покрытия:

- 1 – катодный узел; 2 – плазменная дуга; 3 – источник питания;  
4 – обрабатываемые образцы; 5 – графитовый анод;  
6 – водоохлаждаемый токоподвод; 7 – электропривод подачи электрода

В результате проведенных экспериментов по плазменной обработке поверхности силикатных изделий установлено, что на поверхности за счет взаимодействия потоков низкотемпературной плазмы с силикатным кирпичом реализуется процесс плавления, который можно рассматривать как продолжение процесса силикатообразования, отличающегося от последнего тем, что этот процесс протекает с образованием расплава, который частично диффундирует в поры и микротрещины изделия, обеспечивая надежное сцепление с основой. Исследования показали, что при воздействии плазмы на силикатный кирпич с учетом распределения температурных полей в глубь изделия образуется слоистая структура (рисунок 12).

1...2 мм — Переходный слой 2...4 мм	Стекловидное покрытие	2400...3100 К
	Стеклофаза+дегидратированные силикаты	800...1200 К
	Дегидратированные силикаты	400...800 К
	Основа изделия	400...800 К

Рисунок 12 – Схема распределения температурных полей в глубь изделия

Кроме того, процесс плавления поверхности силикатных изделий протекает мгновенно, поэтому газовые фазы способствуют образованию пористого покрытия. Установлено, что прочность сцепления стекловидного покрытия с основой определяется мощностью плазменного воздействия посредством переходного слоя и зависит от его структуры. Максимальная прочность сцепления 3,07 МПа возможна при плазменном воздействии мощностью 75 кВт.

При испытании силикатного кирпича, поверхность которого обработана потоками низкотемпературной плазмы, на морозостойкость после 75 циклов замораживания и оттаивания, ультрафиолетового облучения, дождевания и ветра остались без очевидных признаков разрушения. Кроме того, получены данные по определению химической стойкости силикатного кирпича и стекловидного покрытия. Устойчивость стекловидного покрытия к действию растворов кислот определяется содержанием в стекле оксидов кремния и алюминия. С увеличением содержания этих компонентов в стеклофазе кислотостойкость возрастает. Из представленных данных (таблица 6) следует, что прочность сцепления покрытия до испытания на морозостойкость и после изменилась незначительно, это свидетельствует о жизнестойкости и долговечности изделий с защитно-декоративным покрытием. Частичное снижение прочности сцепления покрытия с основой на некоторых образцах связано с разрушением структурной целостности самого изделия.

Таблица 6 – Характеристики защитно-декоративного покрытия силикатного кирпича

Материал	Прочность сцепления покрытия с основой, МПа	Прочность сцепления покрытия после 75 циклов испытаний на морозостойкость, МПа	Химическая стойкость, %	
			Основа силикатного кирпича	Защитно-декоративное покрытие
Силикатный кирпич, обработанный плазмой	3,07	2,89	79,12	98,43

Существующий уровень развития плазменной техники позволяет адаптировать плазменную технологию для получения защитных покрытий на всём многообразии строительных материалов, а рациональные режимы термомодификации обеспечивают приемлемые условия для ее промышленной реализации.

Исследования по применению низкотемпературной плазмы в стройиндустрии определили направление использования энергии плазмы при получении минеральных волокон из высокотемпературных силикатных расплавов на основе техногенных отходов. В качестве сырьевых материалов предлагается использовать базальт, золошлаковые отходы, продукты сжигания горючих сланцев. Разработана и экспериментально апробирована схема электроплазменной установки с дополнительным нагревом струи силикатного расплава, вытекающей из плазменного реактора.

На рисунке 13 представлена схема установки для производства минерального волокна с элементом дополнительного подогрева струи силикатного расплава. Процесс формирования волокон из расплавов осуществляется следующим образом: однородный по температуре и химическому составу расплав, обладающий требуемой вязкостью, поступает в дутьевое устройство, где высокоскоростным турбулентным потоком воздуха перерабатывает-

ся в волокна. Особенностью конструкции струйных головок является специальная кольцевая резонирующая полость, обращенная открытой стороной навстречу потоку энергоносителя.

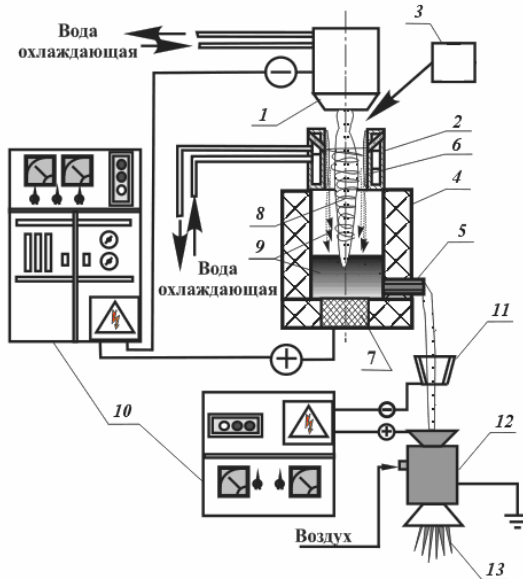


Рисунок 13 – Схема экспериментальной установки для получения силикатного расплава и минеральных волокон:

- 1 – катодный узел; 2 – концентратор тепловой энергии; 3 – дозирующее устройство; 4 – плавильная печь; 5 – летка; 6 – гарнисажный слой;  
 7 – графитовый анод; 8 – плазменная дуга; 9 – расплав;  
 10 – источник питания; 11 – направляющая воронка;  
 12 – устройство для раздува расплава; 13 – минеральные волокна

Механизм раздува заключается в разрушении свободно падающей струи расплава высокочастотными колебаниями, возникающими в результате истечения воздуха из цилиндрического сопла. Моноволокна, полученные из расплавов золы и продукта сжигания сланцев, отличаются по длине и диаметру, что связано с различным химическим составом сырья, а также вязкостью получаемого из него расплава при одинаковых условиях плавления и выработки волокон (рисунок 14). Характер распределения моноволокон

в минераловатном ковре по диаметру говорит о стабильности процесса раздува и надежности работы используемой схемы.



*а*

*б*

Рисунок 14 – Микрофотографии минеральных волокон ( $\times 300$ ):

*а* – золошлаковые отходы  $d = 9$  мкм;

*б* – продукты сжигания сланцев,  $d = 11$  мкм

Установлено, что использование агрегатов низкотемпературной плазмы для получения высокотемпературных силикатных расплавов из сырьевых материалов, представляющих собой золошлаковые смеси и продукты сжигания горючих сланцев, характеризующиеся высоким модулем кислотности, мелкой фракцией и высокой температурой плавления ( $1600\text{--}1700$  °С), позволяет обеспечить формирование качественных минеральных волокон, обладающих высокой химической стойкостью, водостойкостью, средним диаметром  $9\text{--}11$  мкм и длиной  $50\text{--}90$  мм (таблица 7).

Использование энергии плазмы позволяет получать минеральные волокна с повышенным модулем кислотности, который в  $1,75$  раза выше по зольным волокнам и в  $5,57$  раза по волокнам из продуктов сжигания сланцев в сравнении с базальтовыми волокнами, это обусловлено химическим составом сырьевых материалов – высоким содержанием оксидов кремния и алюминия при относительно низком содержании оксидов кальция и магния.

Отличительными свойствами волокна являются высокий модуль кислотности, водостойкость, длина волокна и повышенное значение температуры деструкции. Полученные из силикатных отходов волокна обладают повышенными эксплуатационными характеристиками, что расширяет их область применения. Данная технология реализована на предприятиях: ООО «Черниговский базальт» и ООО «Завод базальтовых материалов».

Таблица 7 – Характеристики волокон и свойства минеральной ваты

Свойства	Минеральное волокно из золы	Минеральное волокно из продуктов сжигания сланцев	Минеральное волокно из базальта
1. Модуль кислотности	9,3	29,6	5,3
2. Средний диаметр волокна, мкм, не более	9	11	8
3. Содержание корольков, %	18	25	16
4. Длина волокна, мм	50–90	60–90	50–70
5. Температура деструкции волокна	765	790	610

Плазменный способ получения минеральных волокон из материалов с повышенным модулем кислотности позволяет использовать природное и техногенное сырье, что обеспечивает получение волокон с повышенными значениями химической и температурной стойкости.

Разработана электроплазменная технология получения стеклокристаллического материала на основе техногенных отходов. Для выполнения поставленной цели был проведен плазмохимический синтез силикатного расплава следующего состава: зола ТЭС (г. Северск, Томская область) – 70 %; известняк – 20 %; кварцевый песок – 10 %. Технологический процесс производства стеклокристаллических материалов заключается в измельчении и тщательном перемешивании компонентов, плавлении, формовании изделий и осуществ-

лении процесса направленной кристаллизации, состоящей из двух этапов. Температура выдержки первого этапа составила  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 1 часа, второго –  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 2 часов. Для исследования влияния технологических особенностей плазменного способа плавления на качество получаемого силикатного расплава создана экспериментальная установка (рисунок 15), которая состоит из источника питания АПР-404, плазмотрона и печи.

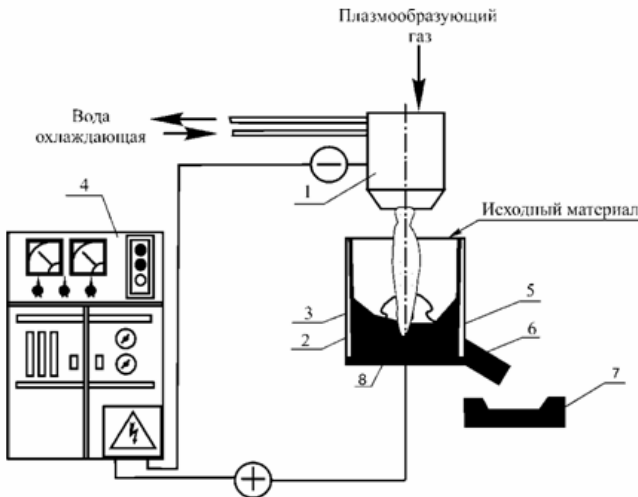


Рисунок 15 – Экспериментальная установка для получения стеклокристаллического материала: 1 – генератор плазмы; 2 – реактор; 3 – гарнисажный слой; 4 – источник питания; 5 – расплав; 6 – летка; 7 – форма; 8 – графитовый анод

Анализ экспериментальных данных показывает, что электроплазменный способ получения силикатного расплава значительно сокращает время плавления, обеспечивает высокую химическую однородность расплава и, как следствие, более широкий интервал выработки и лучшее качество стеклокристаллического материала, о чем свидетельствуют представленные в таблице 8 сравнительные свойства известных аналогов.

Таблица 8 – Свойства стеклокристаллического материала (СКМ) и известных аналогов

Показатели	Зольное стекло «Марблит»	Петроситаллы	Шлако-ситаллы	СКМ, полученные по плазменной технологии
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	2670–2690	2880–2900	2730–2760	2900–2990
Предел прочности при изгибе, МПа	60–70	50–100	40–60	90–110
Предел прочности при сжатии, МПа	300–400	350–450	300–400	450–530
Твердость по Моосу	Около 6	Около 6	Около 6	Около 6

**В заключении** сформулированы основные научные результаты диссертационной работы, предложены перспективы развития исследований в области применения низкотемпературной плазмы при производстве силикатных и других оксидных материалов.

### **Основные выводы**

1. Время нахождения частицы кварца размером 1–2 мм в условиях низкотемпературной плазмы до ее полного расплавления составляет 2–3 секунды. Полное расплавление частицы кварца радиусом 0,64 мм в потоке низкотемпературной плазмы происходит за 0,24 с. При попадании частицы кварца радиусом 1 мм в высокотемпературный силикатный расплав ее полное расплавление происходит за 2,6 с. Реализуемые в плазменном реакторе температуры 3000–3500 °С обеспечивают плавление силикатных смесей с температурами плавления 1500 °С и выше. Для получения однородного расплава размер частиц сырьевых материалов не должен превышать 2 мм, что определяется временем нахождения частицы в плазмохимическом реакторе до ее полного расплавления, при этом реализуемые генератором плазмы удельные тепловые потоки соответствуют  $q = 1-2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.



2. Процесс плавления в условиях низкотемпературной плазмы характеризуется перегревом расплава относительно температуры плавления силикатного сырья более  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что обеспечивает снижение вязкости до значения менее  $10\text{ Па}\cdot\text{с}$  и приводит к одновременному плавлению всех фаз, без испарения оксидов в течение 2–3 секунд.

3. Получение силикатных расплавов в условиях низкотемпературной плазмы протекает в две стадии: одновременное плавление всех фаз шихты с образованием гетерогенного расплава и гомогенизация расплава в условиях пониженной вязкости за счет перегрева материала выше температуры плавления, в отличие от получения расплава по традиционной технологии, состоящей из четырех этапов: образование эвтектических расплавов, растворение тугоплавких компонентов в эвтектических расплавах, получение гетерогенного расплава и его гомогенизация.

4. Плавление кварца в условиях низкотемпературной плазмы при перегреве от температуры плавления более  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 2 секунд приводит к изменению структуры расплава не только в дальнем порядке, но и в ближнем, что ведет к изменению координат атомов и смещению основной полосы поглощения в ИК-спектре продукта плавления от  $1087,2$  до  $1105,4\text{ см}^{-1}$

5. В процессе плавления силикатных смесей создается рециркуляционная зона движения дисперсных частиц в расплаве, обеспечивающая нагрев частиц и их полное расплавление с образованием однородного по температуре и составу силикатного расплава. Такая траектория движения расплава представляется наиболее оптимальной в отношении роста времени прогрева материала до 3 секунд, что обеспечивает полное расплавление частиц.

6. Процесс получения расплава в условиях низкотемпературной плазмы со скоростью нагрева сырьевых материалов более  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  в секунду характеризуется одновременным плавлением всех фаз, в отличие от процессов,

протекающих при обычных скоростях нагрева  $0,5\text{--}1\text{ }^{\circ}\text{C}$  в секунду. Сверхвысокие скорости нагрева сокращают время образования расплава и приводят к уменьшению удельных энергозатрат в  $1,5\text{--}1,8$  раза.

7. Разработанные плазменные технологии получения силикатных расплавов из сырьевых материалов с содержанием оксида кремния от 50 до 100 % в условиях низкотемпературной плазмы позволяют получать продукт с повышенными физико-техническими и эксплуатационными свойствами.

8. Предложенная модель плазменного воздействия на силикатсодержащие сырьевые материалы описывает процесс формирования температурного градиента в зоне входного сечения плазменного реактора, при котором зарождается рециркуляционное течение. Такая траектория движения расплава представляется наиболее оптимальной в отношении роста времени (2–3 секунды) прогрева частиц размером до 2 мм до их полного расплавления, что положено в основу разработок конструкций электроплазменных установок.

9. При температурах  $3000\text{--}3500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , реализуемых в плазмохимическом реакторе, вязкость расплава с содержанием оксида кремния 40–50 % составляет  $2\text{--}5\text{ Па}\cdot\text{с}$ , с содержанием  $\text{SiO}_2$  50–65 % составляет  $5\text{--}20\text{ Па}\cdot\text{с}$ . Высокая вязкость расплава из кварцевого песка ( $\text{SiO}_2\sim 99\%$ ) –  $10^6\text{ Па}\cdot\text{с}$  при температуре  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  ограничивает способы выработки кварцевого стекла. При таких значениях температуры и вязкости применяются методы, используемые при традиционном стекловарении – поэтапная наплавка стекла и получение стеклянных блоков.

10. Технологические и температурные режимы работы плазменной установки для создания защитно-декоративного покрытия на изделиях силикатных строительных материалов позволяют получать продукт с повышенными физико-техническими и эксплуатационными свойствами.

11. Реализация плазменных технологий получения силикатных расплавов и материалов на их основе подтверждает эффективность по критериям энергозатрат и качеству изделий.

**Основные результаты работы представлены  
в следующих публикациях**

*Статьи в журналах из перечня ВАК*

1. **Волокитин, О.Г.** Физико-химические исследования материалов при получении минеральных волокон из техногенных отходов по плазменной технологии / О.Г. Волокитин // Вестник ТГАСУ. – 2009. – № 4. – С. 100–107.
2. **Волокитин, О.Г.** Исследование физических характеристик струи силикатного расплава в условиях дополнительного подогрева / О.Г. Волокитин // Вестник ТГАСУ. – 2010. – № 4. – С. 117–120.
3. **Волокитин О.Г.** Физические основы взаимодействия плазмы с силикатными материалами / О.Г. Волокитин // Вестник ТГАСУ. – 2016. – № 2. – С. 148–154.
4. **Volokitin, O.G.** Generation of ARC Plasma for Materials Processing / O.G. Volokitin, A.S. Anshakov, E.K. Urbakh // Известия вузов. Физика. – 2012. – Том 55. – № 12/2.
5. **Volokitin, O.G.** Plasma technologies in mineral fibers production / O.G. Volokitin, G.G. Volokitin, N.K. Skripnikova // Известия вузов. Физика. – 2012. – Том 55. – № 12/3.
6. **Волокитин, О.Г.** Физико-химические процессы, протекающие при плазмохимическом синтезе силикатных расплавов / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, О.Г. Волокитин, А.А. Заяц // Известия вузов. Физика. – 2014. – № 3/3. – С. 111–114.
7. **Волокитин, О.Г.** Электродуговые и электроплазменные устройства для переработки силикатсодержащих отходов / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрип-

- никова, О.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов // Известия вузов. Физика. – Январь 2014. – № 3/3. – С. 114–119.
8. **Volokitin, O.G.** Plasma treatment of silicate melt obtaining / G.G. Volokitin, N.K. Skripnikova, O.G. Volokitin, A.A. Klopotov, V.V. Shekhovcov // Известия вузов. Физика. – Октябрь 2014. – Том 57. – № 10/3. – С. 91–94.
9. **Волокитин, О.Г.** Модификация поверхности обжиговых материалов низкотемпературной плазмой / В.А. Власов, Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, О.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов // Известия ВУЗов. Физика. – Том 58. – 2015. № 9/2. С. 84–87.
10. **Волокитин О.Г.** 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.
11. **Волокитин О.Г.** Нестационарные режимы гидродинамики и теплопереноса при получении высокотемпературных силикатных расплавов / Н.С. Бондарева, О.Г. Волокитин, О.О. Морозова, М.А. Шеремет // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – № 5. – С. 633–641.
12. **Волокитин О.Г.** Комплекс для получения силикатного расплава из золотходов / М.А. Шеремет, А.А. Никифоров, О.Г. Волокитин // Стекло и керамика. – 2007. – № 9. – С. 23–26.
13. **Волокитин О.Г.** 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.
14. **Волокитин О.Г.** 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.

15. **Волокитин О.Г.** Технология получения минеральных волокон путем утилизации золошлаковых отходов и отходов горючих сланцев / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, О.Г. Волокитин, С. Волланд // *Стекло и керамика*. – 2011. – № 8. – С. 3–5.
16. **Волокитин, О.Г.** Получение минеральных волокон на основе зол республики Казахстан с использованием устройств низкотемпературной плазмы / О.Г. Волокитин, Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова // *Стекло и керамика*. – 2013. – № 9. – С. 31–34.
17. **Волокитин, О.Г.** Комплексное исследование кварц-полевошпатсодержащего сырья и продукта его плавления, полученного в плазменном реакторе / О.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, Г.Г. Волокитин, В.И. Отмахов, Ю.А. Абзаев, Л.А. Егорова, В.В. Шеховцов // *Стекло и керамика*. – 2014. – № 11. – С. 37–40.
18. **Волокитин, О.Г.** Исследование процессов плавления кварцевого песка с помощью низкотемпературной плазмы / Ю.А. Абзаев, Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, О.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов // *Стекло и керамика*. – 2015. – № 6. – С. 44–46.
19. **Волокитин, О.Г.** Минеральное волокно, полученное в агрегатах низкотемпературной плазмы из продуктов сжигания каменного угля и горючих сланцев / О.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, Г.Г. Волокитин, В.И. Верещагин, А.И. Хайсундинов, В.В. Шеховцов // *Строительные материалы*. – 2013. – № 11. – С. 44–47.
20. **Волокитин, О.Г.** Особенности физико-химических процессов получения высокотемпературных силикатных расплавов / О.Г. Волокитин, В.И. Верещагин // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2013. – Том 56. – № 8. – С. 71–76.

21. **Волокитин, О.Г.** Получение силикатных расплавов с высоким силикатным модулем из кварц-полевошпатсодержащего сырья по плазменной технологии / **О.Г. Волокитин**, В.И. Верещагин, Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, В.В. Шеховцов // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2014. – Том 57. – № 1. – С. 73–77.
22. **Волокитин, О.Г.** Melting processes of silica sand in low-temperature plasma technology / О.Г. Волокитин, В.И. Верещагин, В.В. Шеховцов // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2015. – Том 58. – № 1. – С. 62–65.
23. **Волокитин, О.Г.** Получение высокотемпературных силикатных расплавов в плазменных установках / О.Г. Волокитин, В.И. Верещагин, Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова // Техника и технология силикатов – 2013. – № 4. – С. 24–27.
24. **Волокитин, О.Г.** Исследование процессов, протекающих при плазмохимическом синтезе высокотемпературных силикатных расплавов. Часть 1: Анализ отходов обогащения молибденовых руд / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, Ю.А. Абзаев, **О.Г. Волокитин**, В.В. Шеховцов // Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 4. – С. 197–202.
25. **Волокитин, О.Г.** Исследование процессов, протекающих при плазмохимическом синтезе высокотемпературных силикатных расплавов. Часть 2: Анализ продуктов плавления отходов обогащения молибденовых руд / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, Ю.А. Абзаев, **О.Г. Волокитин**, В.В. Шеховцов // Вестник ТГАСУ. – 2014. – № 1. – С. 80–84.
26. **Волокитин, О.Г.** Реализация математической модели теплопереноса в агрегате низкотемпературной плазмы при плавлении силикатных материалов / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, **О.Г. Волокитин**, В.В. Шеховцов // Вестник ТГАСУ. – 2014. – №5. – С. 114–118.

27. **Волокитин, О.Г.** Об исследованиях по использованию плазменной технологии при получении кварцевой керамики. Часть 1. Анализ кварцевого песка Туганского месторождения / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, Ю.А. Абзаев, О.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов // Вестник ТГАСУ. – 2014. – № 5. – С. 108–113.
28. **Волокитин, О.Г.** Исследования по использованию плазменной технологии при получении кварцевой керамики. Часть 2. Анализ продуктов плавления кварцевого песка / Ю.А. Абзаев, Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, О.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов // Вестник ТГАСУ. – 2014. – № 6. – С. 117–122.
29. **Волокитин О.Г.** Расчет времени расплавления частицы кварца в высокотемпературном силикатном расплаве / О.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов // Вестник ТГАСУ. – № 3. – 2015. – С. 159–162.
30. **Волокитин, О.Г.** Исследование наноструктурных фрагментов продуктов плавления кварцевого песка, полученного в агрегатах низкотемпературной плазмы / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, О.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов // Вестник Бурятского государственного университета. – 2015. – № 3. – С. 138–140.

### *Монографии*

31. Физические основы рентгеноструктурного исследования кристаллических материалов / А.А. Клопотов, Ю.А. Абзаев, А.И. Потехаев, **О.Г. Волокитин**, В.Д. Клопотов // Изд-во ТПУ, 2013. – С. 276.
32. Скрипникова, Н.К. Плазмохимические процессы в силикатных материалах: монография / Н.К. Скрипникова, Г.Г. Волокитин, **О.Г. Волокитин**. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. – 250 с.
33. Скрипникова, Н.К. Создание стеклокристаллических материалов с использованием низкотемпературной плазмы: монография / Н.К. Скрип-

никова, А.В. Луценко, Г.Г. Волокитин, **О.Г. Волокитин**. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – 128 с.

### ***Патенты***

34. Пат. 2344093 Российская Федерация. МПК51 C03B 37/04. Установка для получения минеральных волокон / **Волокитин О.Г.**, Никифоров А.А., Скрипникова Н.К. – опубл. 20.01.2009, Бюл. № 2. – 5 с.
35. Пат. 2355651 Российская Федерация. МПК51 C03B 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.
36. Пат. 2503628 Российская Федерация. Плазменная установка для получения тугоплавкого силикатного расплава / **Волокитин О.Г.**, Тимонов Е.В., Волокитин Г.Г., Никифоров А.А., Чибирков В.К. – опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1. – 6 с.
37. Пат. 2565306 Российская Федерация. Способ получения кремнеземистого расплава для кварцевой керамики. **Волокитин О.Г.**, Верещагин В.И., Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Шеховцов В.В. – опубл. 20.10.2015, Бюл. № 29. – 6 с.

### ***Статьи в рецензируемых журналах***

38. **Volokitin, O.G.** Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 89, No. 1, January, 2016, Calculation of the melting process of a quartz particle under low-temperature plasma conditions. V.A. Vlasov, O.G. Volokitin, G.G. Volokitin, N.K. Skripnikova, and V.V. Shekhovtsov.
39. **Volokitin, O.G.** Plasma treatment technology for silicate melt used in mineral fiber production / O.G. Volokitin, V.V. Shekhovcov, Maslov E.A // Advanced materials research Vol. 880 (2014). Pp. 233–236.



40. **Volokitin, O.G.** Physicochemical Processes at Plasma Treatment of Quartz-Feldspar Raw Materials / O.G. Volokitin, G.G. Volokitin, V.V. Shekhovcov // *Advanced materials research* Vol. 1085 (2015). Pp. 474–477.
41. **Volokitin, O.G.** Resource Saving Technology for Plasma Treatment of Molybdenum Ore Tailings / O.G. Volokitin, Skripnikova N.K., Shekhovcov V.V. // *Applied mechanics and materials* Vol. 682 (2014). Pp. 515–518.
42. **Volokitin, O.G.** *Journal of Physics: Conference Series* 652 (2015) 012022. Pp. 1–6. Non-equilibrium melting processes of silicate melts with different silica content at low-temperature plasma. Vlasov V.A., Volokitin O.G., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Shekhovtsov V.V., A Pfuch.
43. **Volokitin, O.G.** *Journal of Physics: Conference Series* 669 (2016) 012065 Plasma technologies application for building materials surface modification. G.G. Volokitin, N.K. Skripnikova, O.G. Volokitin, V.V. Shekhovtsov, A.G. Luchkin and N.F. Kashapov.
44. **Volokitin, O.G.** Definition of Nanostructural Characteristics Melting Product of Quartz Sand / O.G. Volokitin, G.G. Volokitin, N.K. Skripnikova, V.V. Shekhovcov // *Applied Mechanics and Materials: International Conference on Physical Mesomechanics of Multilevel Systems*. AIP Conference Proceedings 1623, 655 (2014). Pp. 655–658.
45. **Volokitin, O.G.** *AIP Conference Proceedings* 1698, 070022 (2016). Plasma technology for creation of protective and decorative coatings for building materials. G.G. Volokitin, N.K. Skripnikova, O.G. Volokitin, V.V. Shekhovtsov.

Подписано в печать 2016 г. Формат 60×84/16  
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ № 231.  
Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.  
Отпечатано с оригинал-макета в ООП ТГАСУ.  
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.