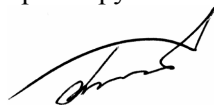


На правах рукописи



Волокитин Олег Геннадьевич

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ
СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ПЛАЗМЕ И МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ**

**Специальность 05.17.11 – Технология силикатных тугоплавких
неметаллических материалов**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2015

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

Научный консультант:

Скрипникова Нелли Карповна, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Минько Нина Ивановна, доктор технических наук, профессор,
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, кафедра «Технология стекла и керамики», профессор

Яценко Елена Альфредовна, доктор технических наук, профессор,
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, кафедра «Общая химия и технология силикатов», заведующий кафедрой, г. Новочеркасск

Буянтуев Сергей Лубсанович, доктор технических наук, профессор,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, кафедра электроснабжения промышленных предприятий сельского хозяйства, электротехнический факультет, профессор, г. Улан-Удэ

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

Защита состоится «16» октября 2015 г. в __ ч __ мин на заседании диссертационного совета Д 212.269.08 ФГАОУВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 43а, корп. 2, ауд. 117.

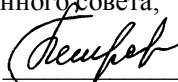
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55, и на сайте

<http://portal.tpu.ru/council/915/worklist>

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор технических наук

 Т.С. Петровская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

При выполнении государственной программы Российской Федерации по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, таким как энергоэффективность и энергосбережение, получение высокотемпературных силикатных расплавов и материалов на их основе с использованием энергии низкотемпературной плазмы является одним из важных аспектов. Получить однородный по температуре и химическому составу силикатный расплав из сырьевых материалов, имеющих температуру плавления 1700–1800 °С, с использованием традиционных технологий ранее не представлялось возможным. В настоящее время накоплен значительный научный и практический опыт в области использования базовых технологий при получении силикатных расплавов, на основе которых сформированы фундаментальные закономерности процессов плавления силикатов при традиционных скоростях нагрева. Известно, что использование энергии низкотемпературной плазмы дает возможность в сотни раз увеличить скорость нагрева силикатных смесей и добиться стабильно высоких температур 3000–3500 °С при получении высокотемпературных силикатных расплавов из сырья с температурой плавления 1700–1800 °С. Кроме того, использование в качестве сырьевых материалов силикатных отходов позволит улучшить экологическую обстановку на территории Российской Федерации и уменьшить себестоимость материалов на их основе за счет использования вторичного сырья.

Актуальной является разработка основ технологии получения силикатных расплавов с использованием энергии низкотемпературной плазмы. Использование энергии низкотемпературной плазмы при плавлении силикатных смесей значительно снижает 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 технологией получения расплавов для создания силикатных материалов различного назначения, установление режимов работы генератора низкотемпературной плазмы, обеспечивающих получение высокотемпературных силикатных расплавов из сырья с различным содержанием оксида кремния и достижение 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, А.В. Болотова, Г.Ю. Даутова. Способствовали развитию плазменных технологий в области разработки и создания генераторов низкотемпературной плазмы исследования ученых Института теплофизики СО РАН А.С. Аньшакова, а также В.Д. Шимановича, Ф.П. Вурзеля, А.Л. Моссе. Однако на сегодняшний день отсутствуют результаты системных исследований использования в строительной отрасли низкотемпературной плазмы при получении силикатных расплавов, что и обуславливает актуальность данной работы. Широко известны результаты исследований по взаимодействию плазмы с силикатными материалами таких ученых, как Н.И. Минько, С.А. Крапивина, В.С. Бессмертный.

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), 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 – природные, техногенные материалы и смеси с содержанием оксида кремния от 50 до 100 % (базальтовые породы, золошлаковые отходы тепловых электростанций, золы после сжигания горючих сланцев, квац-полевошпатсодержащие материалы, кварцевые пески), продукты их плавления, а также материалы на их основе.

Предмет исследования – физико-химические 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 физико-химических закономерностей получения силикатных расплавов из сырья с содержанием оксида кремния 50–100 % с использованием низкотемпературной плазмы.

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

1. Установить закономерности процессов теплопереноса при плавлении дисперсных силикатов в условиях низкотемпературной плазмы.
2. Обосновать и провести теоретический расчет времени плавления частицы кварца в зависимости от ее размера в потоке низкотемпературной плазмы и в силикатном расплаве.
3. Выявить особенности конструкций агрегатов низкотемпературной плазмы для получения высокотемпературных силикатных расплавов и установить теплофизические и электрофизические характеристики плазменного генератора.
4. Определить температурные режимы плазменного воздействия на силикатные материалы и разработать конструкцию плазменного реактора для получения высокотемпературных силикатных расплавов.
5. Исследовать физико-химические процессы получения силикатных расплавов при плавлении в плазмохимическом реакторе.
6. Исследовать и провести сравнительный анализ равновесных и неравновесных процессов при образовании расплава силикатных смесей с различным содержанием SiO_2 .
7. На основе выявленных закономерностей разработать общие положения технологии получения силикатных расплавов из сырья с содержанием оксида кремния 50–100% с использованием низкотемпературной плазмы.
8. Исследовать структуру и свойства материалов на основе силикатных расплавов, установить особенности процессов их получения с использованием энергии низкотемпературной плазмы.

Научная новизна заключается в том, что в работе установлены общие закономерности образования силикатных расплавов с различным содержанием оксида кремния от 50 до 100 %, обеспечивающие создание новых технологий получения силикатных материалов различного назначения с использованием энергии низкотемпературной плазмы.

1. Установлено, что плавление многокомпонентных силикатных систем при завершенности процессов силикатообразования в условиях, близких к равновесным, протекает в две стадии. На первой стадии происходит образование расплава за счет последовательного плавления бинарных и тройных эвтектик (температуры 1170–1350 °С). На второй стадии происходит растворение тугоплавких компонентов в расплаве эвтектик (температуры 1350–1400 °С), что положено в основу алгоритма и методики расчета кривых плавкости многокомпонентных систем.

2. Установлено, что процесс получения гомогенного расплава в условиях низкотемпературной плазмы происходит в два этапа: одновременное плавление всех компонентов (температуры 1800–2000 °С) и их гомогенизация (температуры > 2000 °С) в отличие от схемы образования расплава при технических скоростях нагрева, состоящей из четырех этапов: образования эвтектического расплава, растворение тугоплавких компонентов в эвтектическом расплаве, получение гетерогенного расплава и его гомогенизация.

3. Установлено, что время нахождения силикатной частицы размером не более 2 мм в зоне низкотемпературной плазмы (3000–3500 °С) не должно превышать 3 секунд. За этот период осуществляется нагрев частицы до температуры плавления и переход ее в расплавленное состояние, при этом проявление процессов сублимации и испарения не обнаружено, удельные тепловые потоки составляют $q=1,8 \cdot 10^6$ Вт/м².

4. Установлено, что перегрев расплава относительно температуры плавления более 300 °С обеспечивает снижение вязкости расплава до значения менее 10 Па·с и его гомогенизацию, кроме того дополнительный омический нагрев расплава ускоряет процессы гомогенизации. Вязкость силикатного расплава зависит от содержания оксида кремния, что определяется степенью полимеризации кремнекислородных тетраэдров.

5. Установлено, что при плавлении кварца в низкотемпературной плазме в условиях перегрева от температуры плавления более 300 °С в течение 2 секунд происходит изменение структуры расплава 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 от 1087,2 до 1105,4 см⁻¹.

6. Установлено, что получение расплава в условиях низкотемпературной плазмы со скоростью нагрева сырьевых материалов более 1000 °С в секунду характеризуется одновременным плавлением всех фаз, в отличие от процессов, протекающих при обычных скоростях нагрева 0,5–1 °С в секунду. Сверхвысокие скорости нагрева сокращают время образования расплава и уменьшают удельные энергозатраты в 1,5–1,8 раза. При этом требования к исходной шихте сводятся к ее однокомпонентности, отсутствию в ее составе разлагающихся компонентов и завершенности процессов силикатообразования.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Предложены основы получения высокотемпературных силикатных расплавов из материалов с содержанием SiO_2 50–100 % по плазменной технологии.

2. Предложена технология получения высокотемпературных силикатных расплавов с содержанием оксида кремния от 50 до 100 % с использованием энергии низкотемпературной плазмы для создания материалов различного назначения.

3. Разработаны конструкции электроплазменных установок, включающие генератор низкотемпературной плазмы, плазмохимический реактор и устройство для переработки расплава в силикатные материалы различного назначения из сырья с содержанием оксида кремния 50–100 %.

4. Предложена конструкция плазменного реактора со шнековой подачей мелкодисперсных сырьевых материалов непосредственно в зону плавления, которая исключает выдувание этих частиц потоками низкотемпературной плазмы и в процессе плавления понижает вязкость расплава и обеспечивает его равномерный прогрев.

5. Разработан способ дополнительного омического нагрева, который дает возможность повышать температуру силикатного расплава за счет его электропроводности, что приводит к ускорению процесса плавления силикатного сырья.

6. 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.

7. Предложена методика оценки неравновесных процессов при плавлении потоками низкотемпературной плазмы силикатных материалов с учетом химического состава для курса «Физическая химия тугоплавких, неметаллических и силикатных материалов» (внедрена в учебный процесс ТГАСУ и НИ ТПУ).

Методология и методы диссертационного исследования

Основой для диссертационного исследования послужили современные положения теории и практики технологии силикатных тугоплавких неметаллических материалов, а также плазменных технологий.

Достоверность научных положений и выводов обеспечена применением комплекса взаимодополняющих методик, адекватных цели и задачам исследования, получением обширного фактического мате-

риала и его разносторонним 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); на Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в науке и образовании» (Улан-Удэ, 2011); 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); 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); Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2013, 2014); 1st International Conference on Computational and experimental methods for composite materials and structures (Harbin, China, 2014).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, и 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 2 монографии, 1 учебное пособие, 8 патентов РФ и 34 статьи 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 и приложения. Работа изложена на 286 страницах, включая 94 рисунка, 55 таблиц.

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 обзору и анализу текущего состояния и существующих особенностей, проблем и недостатков современной теории и практической реализации процессов получения силикатных расплавов, обоснованию и формулировке 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.

Проведенный анализ позволяет выделить ряд проблем, ограничивающих должное развитие выбранного направления исследований в науке и технике, а также привести следующие пути их решения: корректное и физически обоснованное аналитическое описание процесса взаимодействия высококонцентрированных потоков плазмы с силикатсодержащими материалами; детальное изучение генераторов низкотемпературной плазмы и обоснование их применения для получения высокотемпературных силикатных расплавов; сравнение результатов математического моделирования процессов теплопереноса и установления времени плавления частиц кварца в условиях низкотемпературной плазмы с результатами реального эксперимента; выявление особенностей и установление оптимальных режимов работы при получении силикатных расплавов из материалов с содержанием оксида кремния до 100 %.

Во второй главе обоснован выбор сырьевых материалов для исследований, изложена краткая характеристика их свойств, химический состав, модуль кислотности, модуль вязкости и особенности приме-

ния. В таблице 1 представлен химический состав основных сырьевых материалов, исследуемых в работе.

Таблица 1 – Химический состав сырьевых компонентов

Сырьевые материалы	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	Δm_{np}
Базальтовая порода	50,40	16,17	7,24	8,98	3,37	3,14	10,70
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-полевошпат-содержащее 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	0,00036	–	0,0085	0,00036	0,03	–

Анализ таблицы показал, что для получения силикатных расплавов использованы сырьевые материалы с различным содержанием оксида кремния от 50 до 100 %. К материалам природного происхождения относятся базальтовая порода, кварц-полевошпатсодержащее сырье и кварцевый песок. В качестве техногенного сырья использовались золы и продукты сжигания сланцев.

В данном разделе приводится описание используемых методов исследования и используемого оборудования. Описаны примененные подходы при проведении исследований характеристик сырьевых силикатсодержащих материалов. Приводится описание аналитического оборудования и методик изучения физико-химических особенностей сырьевых материалов силикатной группы. Приведена и обоснована структурно-методологическая схема получения силикатных расплавов с различным содержанием SiO₂ и продуктов их плавления.

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, произведен 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.

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.

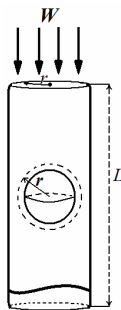


Рисунок 1 – Схема плазменного воздействия

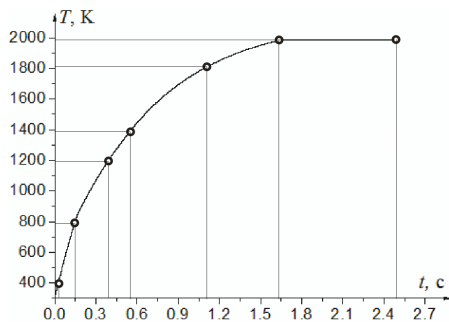


Рисунок 2 – Изменение температуры частицы во времени, $r = 1$ мм

В таблице 2 приведены значения предельного радиуса частицы кварца, успевающей полностью расплавиться за время движения частицы до дна установки.

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.

Таблица 2 – Значение предельного радиуса расплавления частиц

W, л/с	Время плавления, с	Размер расплавляемых частиц, мм
0,65	0,24	1,28
1	0,16	1,04
1,4	0,11	0,88

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.

На рисунке 3 представлен график зависимости времени расплавления t от радиуса частицы при попадании ее в высокотемпературный силикатный расплав. Результаты расчета также представлены в таблице 3.

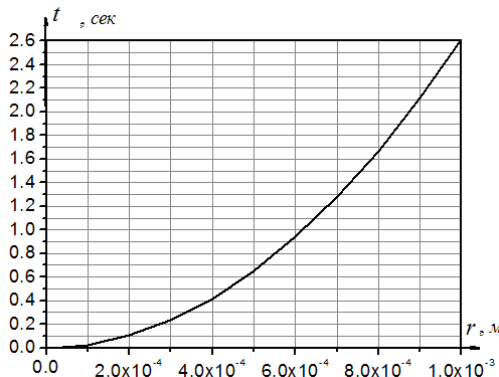


Рисунок 3 – Зависимость времени плавления t от начального радиуса частиц r

Таблица 3 – 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

Из расчетов были получены зависимости времени, необходимого для полного расплавления частицы от ее размера. Расчеты показали, что частицы размером 2 мм полностью расплавляются за время 2,61 с, частицы размером 0,4 мм расплавляются за 0,1 с.

Оценки показали, что 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 4 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.

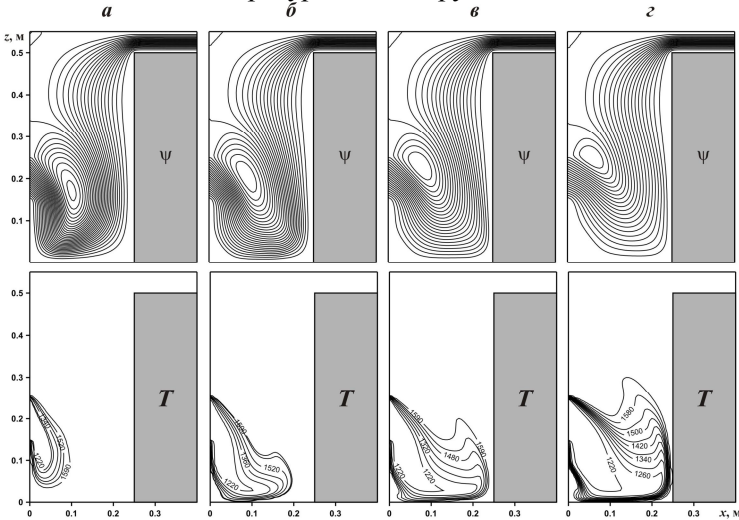


Рисунок 4 – Изолинии функции тока ψ и температуры T :
 $a - t = 5$ с, $b - t = 10$ с, $v - t = 15$ с, $z - t = 20$ с

В результате формирования температурного градиента в зоне входного сечения зарождается рециркуляционное течение, препятствующее непосредственному выходу материала в центральную часть полости. С ростом времени наблюдается продвижение температурного фронта и соответственно охлаждение нижней части полости.

На основе проделанного анализа установлено, что формирование рециркуляционной зоны вблизи входного сечения на начальном временном этапе отражается на более качественном расплавлении поступающего в плазменный реактор материала. Под качественным расплавлением материала в рассматриваемой математической постановке подразумевается более длительный прогрев материала. Повышение времени прогрева материала может достигаться путем увеличения времени пребывания его в полости печи. 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. Такая траектория движения расплава представляется наиболее оптимальной в отношении роста времени прогрева материала и не требует дополнительного изменения конфигурации плавильной печи.

В четвертой главе с использованием полученных математических соотношений и установлением 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, предложена серия плазменных комплексов для получения химически однородных силикатных расплавов.

Предварительно были установлены рабочие режимы плазменного генератора и теплофизические параметры дугового разряда (таблица 4).

Таблица 4 – Рабочие режимы и теплофизические параметры плазмотрона

№ режимов	Мощность плазмотрона, кВт	Сила тока, А	Напряжение, В	Удельный тепловой поток, Вт/м ²
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/м², 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, за счет 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 была разработана экспериментальная плавильная печь (Патент РФ 2503628) для получения силикатных расплавов плазменным методом (рисунок 5).

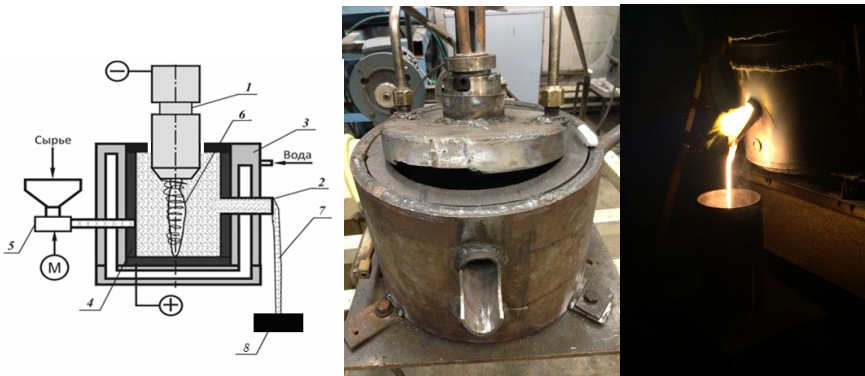


Рисунок 5 – Схема экспериментальной плазменной установки для получения высокотемпературных силикатных расплавов:

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

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, соединенного непосредственно с зоной плавления плавильной печи загрузочным бункером и электроприводом. 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. Сырье вводится в толщу уже образованного расплава, и в результате посредством джоулева нагрева по всему объему плавильной печи производится расплав введенного порошкообразного сырья. Это позволяет понизить вязкость расплава и обеспечить равномерный его прогрев. Предварительно весь объем плавильной печи 3 заполняют тугоплавким силикатным порошкообразным сырьем. В водоохлаждающий канал плавильной печи 3 через патрубки подают воду во избежание перегрева ее стенок. Включают источник постоянного тока. Между анодом (графитовый тигель 4) и катодом плазмотрона 1 инициируется поток низкотемпературной плазмы 6. Под действием высокой температуры (3000–5000 °С) плазменного потока начинает плавиться силикатное сырье. После того, как водоохлаждаемая плавильная печь 3 будет полностью заполнена расплавом, с помощью шнекового питателя 5 с боковой стороны плавильной печи 3 начинают вводить непосредственно в полученный расплав дозируемое порошкообразное сырье. Частицы поступившей порции сырья, попадая в высокотемпературный расплав, смешиваются с ним и равномерно расплавляются. Кроме того, такого рода подача сырья позволяет исключить потерю мелкодисперсных частиц, выдуваемых 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. Дозированная подача сырья в зону плавления печи осуществляется непрерывно. Графитовый тигель и устройство его охлаждения позволяют продлить срок службы плавильной печи. Полученный расплав в виде струи подается к узлу сбора расплава или к узлу волокнообразования.

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 мелкодисперсного однокомпонентного полифазного сырьевого материала с замкнутым объемом,

отличающаяся принципиально новой схемой подачи исходного сырья и отсутствием сливного желоба (рисунок 6).

Проведенные эксперименты показали возможность получения высокотемпературного силикатного расплава из мелкодисперсного сырья. Установлено, что энергии низкотемпературной плазмы достаточно для получения силикатного расплава с температурой плавления около 1700°C . Экспериментально установлено, что на основе исследуемого сырьевого материала с содержанием SiO_2 более 62 %, подтверждается возможность получения продукта с высокой степенью аморфности с помощью низкотемпературной плазмы; при этом не происходит вытекание расплава из плавильной печи, используется система с замкнутым объемом. Такая схема используется при получении высоковязких расплавов со значениями вязкости более $10^5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ для последовательного наплавления продукта без его слива.

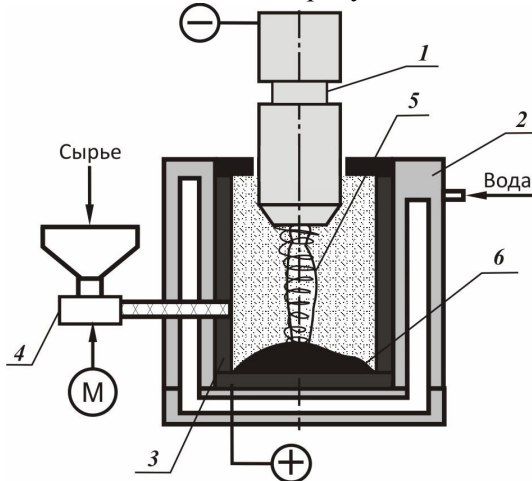


Рисунок 6 – Схема экспериментальной плазменной установки для получения высокотемпературных силикатных расплавов:

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 7).

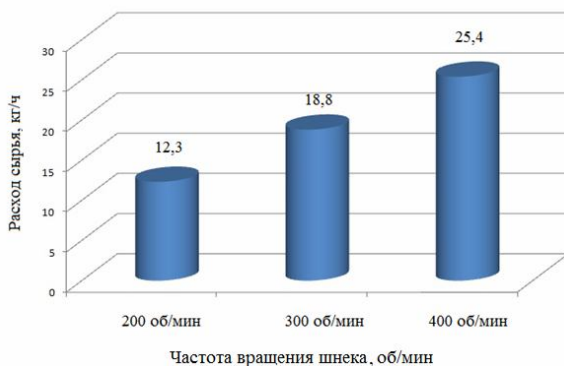


Рисунок 7 – Производительность шнекового дозатора при различном числе оборотов вала электродвигателя

Установлено, что максимальная производительность используемого шнекового питателя при количестве оборотов вала 400 об/мин составляет 25,4 кг/ч. При уменьшении количества оборотов до 200 об/мин расход сырья снижается до 12,3 кг/ч.

В пятой 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 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 диаграмме состояний, а именно: построение кривых плавкости, выражающих зависимость количества жидкой фазы от температуры исследуемых систем определенного состава. Далее в работе проведен анализ процессов при плавлении силикатных материалов с учетом их реального химического состава (рисунок 8).

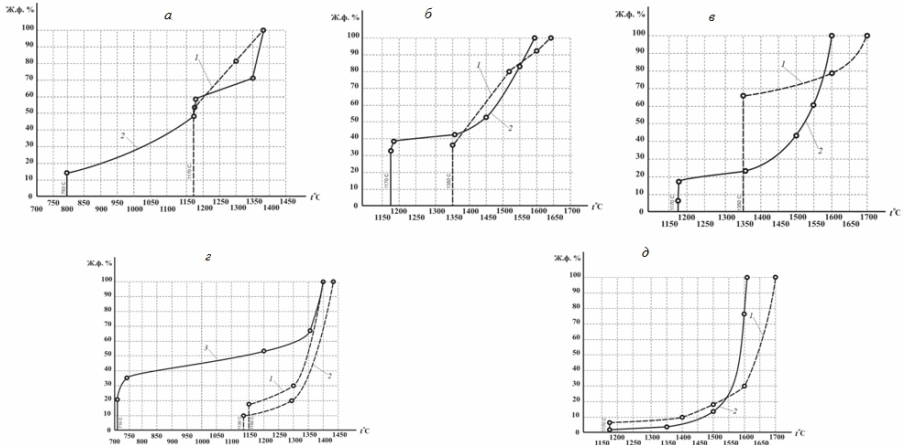


Рисунок 8 – Кривые плавкости: *а* – базальта; *б* – золы; *в* – продукта сжигания сланца; *г* – кварц-полевошпатсодержащего сырья; *д* – кварцевого песка; *1* – равновесная зависимость в системе $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$; *2* – зависимость с учетом фактического химического состава; *3* – равновесная зависимость в системе $\text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

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 5).

Таблица 5 – Изменение количества расплава при плавлении сырьевых материалов с учетом химического состава

Сырьевые материалы	Температура образования первичного расплава, °C	Количество первичного расплава, %	Температура образования 100%-го расплава, °C
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

Анализ процессов образования расплава при плавлении исследуемых сырьевых материалов с учетом фактического химического состава позволил сформулировать некоторые особенности плавления реальных смесей в условиях низкотемпературной плазмы: образование первичного расплава в смесях со сложным химическим и фазовым составом происходит при температурах ниже, чем в модельных смесях, приведенных к тройной системе. Разница в температурах образования первичного расплава определяется химическим составом сырья, наличием щелочных оксидов и оксидов металлов. Кривые плавкости реальных смесей характеризуются более низкими температурами образования 100%-го расплава за счет быстрого нагрева и плавления одновременно всех составляющих смеси. 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 помощью 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 (рисунки 9, 10, таблица 6).

Таблица 6 – Основные полосы поглощения ИК-спектров стекол

Полосы поглощения	Волновое число, см ⁻¹				
	Базальт SiO ₂ ~50 %	Продукты сжигания сланцев SiO ₂ ~61 %	Зола SiO ₂ ~51 %	Кварц-полевошпат-содержащее сырье SiO ₂ ~62 %	Кварцевый песок SiO ₂ ~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

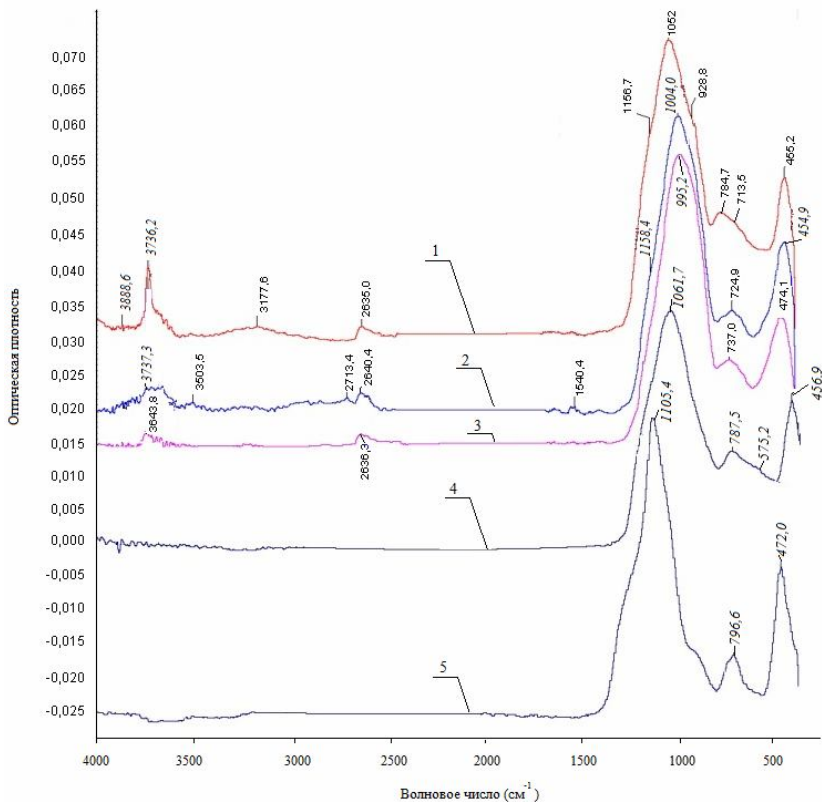


Рисунок 9 – ИК-спектры поглощения стекол полученных из:
 1 – золы ТЭЦ; 2 – продукта сжигания горючих сланцев;
 3 – базальта; 4 – кварц-полевошпатсодержащего сырья;
 5 – кварцевого песка Туганского месторождения

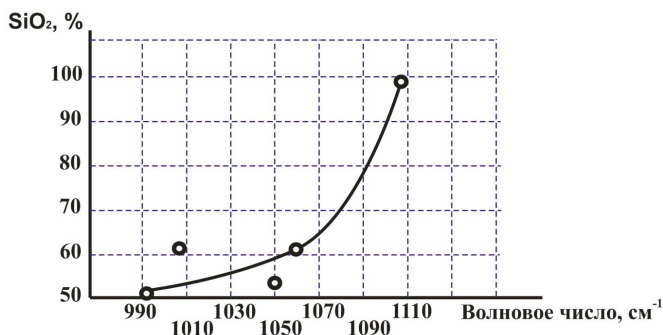


Рисунок 10 – Изменение основного спектра поглощения для стекол из различных сырьевых материалов

Анализ таблицы 6 показал, что 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_2O_3 , 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 $1105,4 \text{ см}^{-1}$ наиболее приближен к аналогичному максимуму полосы поглощения для кварцевого стекла, представляющего собой наиболее упорядоченную полимерную структуру.

Комплексный анализ полученных ИК-спектров сырьевых материалов и продуктов их плавления показал, что исходные материалы неоднородны, т. к. они являются многокомпонентной физико-химической системой, включающей в свой состав различные оксиды, что подтверждается минералогическим анализом, а продукты плавления характеризуются однородностью и упорядоченностью, т. е. процесс плавления сырьевых материалов обеспечил полную гомогенизацию расплава. На основании полученных результатов можно сделать вывод об однородности структуры продуктов плавления и расплавов, из которых эти продукты были получены.

На примере кварцевого песка приведено пространственное распределение атомов в ячейке минерала SiO_2 в исходном состоянии и после плазмохимического воздействия (рисунок 11).

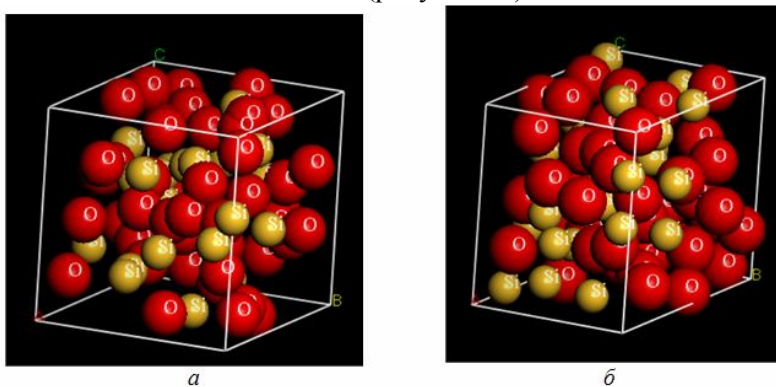


Рисунок 11 – Пространственное распределение атомов в решетке SiO_2 кварцевого песка:

a – в исходном состоянии; b – в продукте плавления

Проведенные исследования позволили с высокой степенью достоверности определить относительное содержание фаз в кварцевом песке как в исходном, так и после плазмохимической обработки, 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. Это проявляется, прежде всего, в перераспределении доли основной фазы SiO_2 за счет ее аморфизации.

На основании сделанных выводов сформированы обобщенные модели процессов, протекающих при технических скоростях нагрева и при быстром нагреве в условиях низкотемпературной плазмы (рисунки 12, 13).

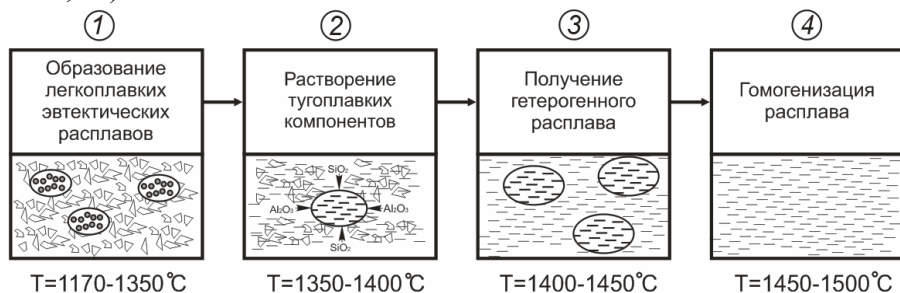


Рисунок 12 – Схема неравновесных процессов плавления силикатных смесей при технических скоростях нагрева

В общем виде процесс получения расплава при технических скоростях нагрева состоит из четырех этапов, на первом этапе происходит образование первичного расплава эвтектик, далее, с увеличением температур, происходит плавление эвтектик различного состава, затем происходит образование расплава за счет растворения оксидов кремния и алюминия в высокотемпературном расплаве. На третьем этапе происходит образование гетерогенного расплава локально, по всему объему смеси. С повышением температур расплав локальных областей перемешивается друг с другом и происходит выравнивание химического состава расплава и его гомогенизация.

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

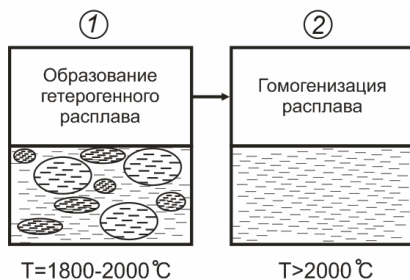


Рисунок 13 – Схема неравновесных процессов плавления силикатных смесей в условиях низкотемпературной плазмы

Процесс получения расплава в условиях низкотемпературной плазмы отличается отсутствием отдельных этапов образования первичного эвтектического расплава и растворения оксидов в расплаве. 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 шестой главе описаны реализованные и перспективные технологии обработки и создания новых материалов (рисунок 14).

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



Рисунок 14 – Реализованные и перспективные плазменные технологии

Улучшаются его физико-механические характеристики и декоративные свойства. Применение низкотемпературной плазмы позволяет

модифицировать поверхность и получить стекловидное покрытие, которое улучшает эксплуатационные свойства изделий и их долговечность (рисунок 15).

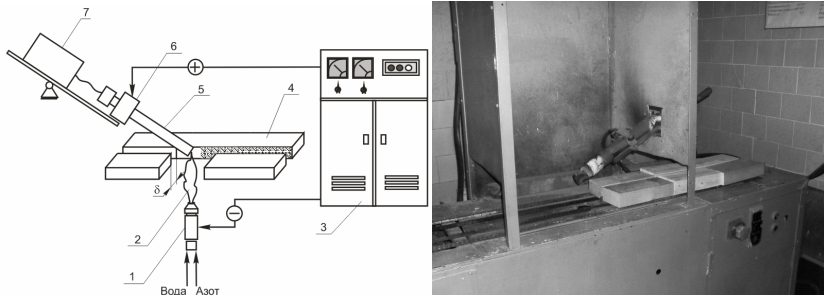


Рисунок 15 – Комплекс оборудования для создания защитно-декоративного покрытия:

- 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 вглубь изделия образуется слоевая структура (рисунок 16).

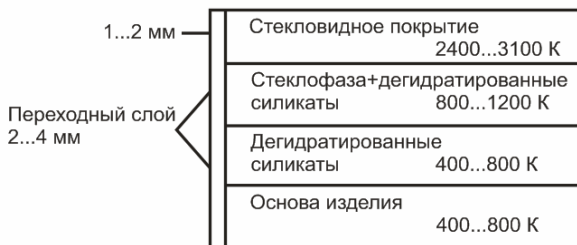


Рисунок 16 – Схема распределения температурных полей вглубь изделия

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 (таблица 7).

Таблица 7 – Свойства стекловидного покрытия
в зависимости от мощности плазменного воздействия

Мощность, кВт	Скорость перемещения конвейера, м/с	Толщина покрытия, мм	Прочность сцепления покрытия с основой, МПа
24	0,03	0,36	1,54
	0,06	—	—
36	0,03	0,65	0,86
	0,06	0,24	1,32
	0,08	—	—
56	0,045	0,68	1,11
	0,06	0,52	1,32
	0,08	0,36	1,63
	0,10	0,50	2,22
75	0,13	0,32	3,07
	0,17	0,22	2,89

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 (таблица 8). Из представленных данных следует, что прочность сцепления покрытия до испытания на морозостойкость и после изменилась незначительно, что 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 8 – Характеристики силикатного кирпича и защитно-декоративного покрытия

Материал	Прочность сцепления покрытия с основой до испытания, МПа	Прочность сцепления покрытия с основой после испытания, МПа	Химическая стойкость, %	
			Силикатный кирпич	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.

Экспериментальные 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, золотшлаковые отходы, продукты сжигания горючих сланцев. Разработана и экспериментально опробована схема электроплазменной установки с дополнительным нагревом струи силикатного расплава, вытекающей из плазменного реактора.

На рисунке 17 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 перерабатывается в волокна. Особенностью конструкции струйных головок является специальная кольцевая резонирующая полость, обращенная открытой стороной навстречу потоку энергоносителя.

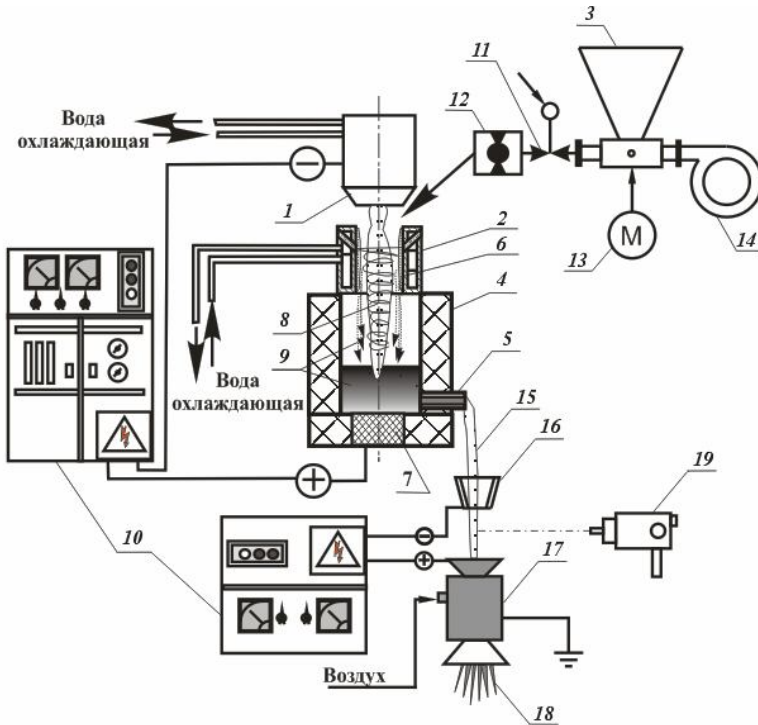


Рисунок 17 – Схема экспериментальной установки для получения силикатного расплава и минеральных волокон:

- 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 расходомер;
- 13 – 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

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 18). Характер распределения моноволокон в минераловатном ковре по

диаметру говорит о стабильности процесса раздува и надежности работы используемой схемы.



Рисунок 18 – Микрофотографии минеральных волокон($\times 300$):

a – 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 9).

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.

Таблица 9 – Характеристики волокон и свойства минеральной ваты

Свойства	Минеральное волокно из золы	Минеральное волокно из продуктов сжигания сланцев	Минеральное волокно из базальта	ВМ-В ГОСТ 4640-93
1. Модуль кислотности	9,3	29,6	5,3	Не менее 1,4
2. Водостойкость, рН, не более	7	7	6	7
3. Средний диаметр волокна, мкм, не более	9	11	8	12
4. Содержание корольков, %	18	25	16	25
5. Длина волокна, мм	50–90	60–90	50–70	40–60
6. Плотность, кг/м ³ , не более	60	50	70	100
7. Температура деструкции волокна	765	790	610	–
8. Теплопроводность при температуре (398±5) К, Вт/(м·К), не более	0,061	0,060	0,063	0,066

Возможность получения минеральных волокон из материалов с повышенным модулем кислотности с использованием плазменных технологий расширяет номенклатуру сырьевых материалов, пригодных для создания теплоизоляционных изделий.

Разработана электроплазменная технология получения стеклокристаллического материала на основе техногенных отходов. Для выполнения поставленной цели был произведен 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 и формовании изделий. Для исследования влияния технологических особенностей плазменного способа плавления на качество получаемого силикатного расплава создана экспери-

ментальная установка (рисунок 19), которая состоит из источника питания АПР-404, плазмотрона и печи.

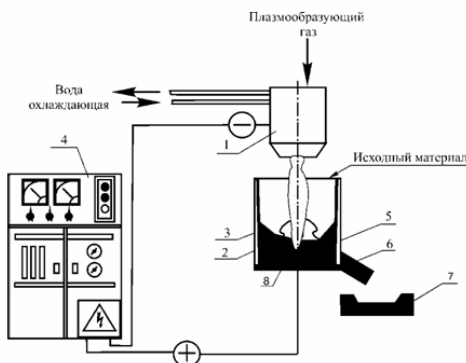


Рисунок 19 – Экспериментальная установка для получения стеклокристаллического материала: 1 – генератор плазмы; 2 – реактор; 3 – гарнисажный слой; 4 – источник питания; 5 – расплав; 6 – летка; 7 – форма; 8 – графитовый анод

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 10 сравнительные свойства известных аналогов.

Таблица 10 – Свойства стеклокристаллического материала (СКМ) и известных аналогов

Показатели	Зольное стекло «Марблит»	Петроситаллы	Шлако-ситаллы	СКМ, полученные по плазменной технологии
Средняя плотность, кг/м ³	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
Водопоглощение, %	0	0	0	0

Основные выводы

1. Значительная разница температур плазменного потока и температуры плавления силикатов и оксидов более 1000 °С обеспечивает условия плавления силикатных частиц размером до 2 мм в течение 3 секунд, что является основой создания технологии получения силикатных расплавов с содержанием SiO_2 50–100 % с использованием энергии низкотемпературной плазмы.

2. Реализуемое в плазменном реакторе температурное поле 3000–3500 °С обеспечивает расплавление силикатных смесей с температурами плавления до 1700 °С и более, при этом реализуемые генератором плазмы удельные тепловые потоки ($q = 1\text{--}3 \cdot 10^6$ Вт/м²) обеспечивают сокращение времени нахождения частицы в плазмохимическом реакторе. Полное расплавление частицы кварца радиусом 0,64 мм в потоке низкотемпературной плазмы происходит за 0,24 сек. При попадании частицы кварца радиусом 1 мм в высокотемпературный силикатный расплав ее полное расплавление происходит за 2,6 сек, частица радиусом 0,2 мм расплавится за 0,1 сек. 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.

3. Процесс получения расплава в условиях низкотемпературной плазмы со скоростью нагрева сырьевых материалов более 1000 °С в секунду характеризуется одновременным плавлением всех фаз, в отличие от процессов, протекающих при обычных скоростях нагрева 0,5–1 °С в секунду. Сверхвысокие скорости нагрева сокращают время образования гетерогенного расплава, при этом гомогенизация обеспечивается низкими значениями вязкости расплава.

4. Получение силикатных расплавов в условиях низкотемпературной плазмы протекают 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. При этом требованием к исходному материалу шихты является отсутствие разлагающихся компонентов и завершенность процессов силикатообразования. Получение силикатных расплавов по традиционным технологиям включает стадии: силикатообразование, плавление первичного эвтектического расплава, растворение тугоплавких оксидов (SiO_2 , Al_2O_3 и др.) в первичном расплаве, гомогенизация расплава при температурах 1450–1500 °С.

5. При температурах 3000–3500 °C, реализуемых генератором низкотемпературной плазмы, вязкость расплава с содержанием оксида кремния 40–50 % составляет 2–5 Па·с, с содержанием SiO₂ 50–65 % составляет 5–20 Па·с. Электромагнитное перемешивание и дополнительный омический нагрев силикатного расплава в плазмохимическом реакторе обеспечивает гомогенизацию расплава. Высокая вязкость расплава из кварцевого песка – 10⁶ Па·с при температуре 2000 °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.

6. Разработанный плазмохимический реактор обеспечивает получение силикатных расплавов из материалов с содержанием оксида кремния 50–100 %, при этом время расплавления подаваемых дисперсных частиц размером до 2 мм не превышает 3 с. Удельные тепловые потоки составляют $q = 1,8\text{--}2,6 \cdot 10^6$ Вт/м².

7. 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 химическому составу силикатного расплава. Такая траектория движения расплава представляется наиболее оптимальной в отношении роста времени прогрева материала до 3 секунд, что обеспечивает полное расплавление частиц.

8. Выбор конструкции реактора определяется вязкостью силикатного расплава. При значениях вязкости силикатного расплава более 10⁵ Па·с необходимо использовать плазмохимический реактор с замкнутым объемом, при вязкости менее 10⁵ Па·с используется схема, обеспечивающая слив высокотемпературного силикатного расплава. Прохождение электрического тока через силикатный расплав в процессе работы плазмохимического реактора позволяет оперативно влиять на значения температуры и вязкости расплавленного материала и, как следствие, на качество получаемой готовой продукции.

9. Реализованные плазменные технологии создания защитно-декоративного покрытия на строительных материалах и получения минеральных волокон позволяют получать продукт с повышенными физико-химическими и эксплуатационными свойствами.

10. Предложенная технологическая схема получения стеклокристаллических материалов и кварцевого стекла с использованием энергии низкотемпературной плазмы является альтернативой газопламен-

ной технологии, при этом удельный расход энергии сокращается в 1,5–1,8 раза.

11. Использование плазменной технологии обеспечивает решение задачи получения стеклогранулята для пеностекла и пеностеклокристаллических материалов. При этом сокращается размер агрегатов, энергия и время образования расплава.

Основные результаты работы представлены в следующих публикациях

Монографии

1. Физические основы рентгеноструктурного исследования кристаллических материалов / А.А. Клопотов, Ю.А. Абзаев, А.И. Потекаев, **О.Г. Волокитин**, В.Д. Клопотов // Изд-во ТПУ. – 2013. с. 276.
2. 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.
3. Электротехнологические установки для плазменно-термической обработки материалов : Учебное пособие для вузов / А.С. Аньшаков, Г.Г. Волокитин, **О.Г. Волокитин**, Н.К. Скрипникова. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. – 126 с.

Патенты

4. 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.
5. 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.
6. Пат. 2358929 Российская Федерация. МПК51 C04B 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.
7. Пат. 2484951 Российская Федерация. Способ получения защитно-декоративного покрытия на древесине. **Волоки-**

- тин О.Г.**, Цветков Н.А., Волокитин Г.Г., Черкашина Н.А. – опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17. – 8 с.
8. 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.
 9. Патент на полезную модель № 131664 Российская Федерация. Линия по производству керамического кирпича методом полусухого прессования. Скрипникова Н.К., Волокитин Г.Г., Юрьев И.Ю., **Волокитин О.Г.**, Шеховцов В.В., Заяц А.А. – опубл. 27.08.2013, Бюл. № 24. – 6 с.
 10. Пат. 2532933 Российская Федерация Сырьевая смесь для изготовления золокерамических изделий. Скрипникова Н.К., Юрьев И.Ю., **Волокитин О.Г.**, Волокитин Г.Г., Луценко А.В., Третьякова М. С. – опубл. 20.11.2014, Бюл. № 32. – 5 с.
 11. Пат. 2533143 Российская Федерация Способ получения ультрадисперсных порошков карбонатов. Скрипникова Н.К., **Волокитин О.Г.**, Волокитин Г.Г. – опубл. 20.11.2014, Бюл. № 2. – 9 с.

Статьи в центральной печати

12. Шерemet, М.А. Комплекс для получения силикатного расплава из золоотходов / М.А. Шерemet, А.А. Никифоров, **О.Г. Волокитин** // Стекло и керамика. – 2007. – № 9. – С. 23–26.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. **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.

17. 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.
18. **Волокитин, О.Г.** Исследование физических характеристик струи силикатного расплава в условиях дополнительного подогрева / О.Г. Волокитин // Вестник ТГАСУ. – 2010. – №4. – С. 117–120.
19. 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.
20. **Volokitin, O.G.**, Anshakov A.S., Urbakh E.K. Generation of ARC Plasma for Materials Processing. Известия вузов. Физика. Декабрь 2012. Том 55, № 12/2.
21. **Volokitin, O.G.**, Volokitin G.G., Skripnikova N.K. Plasma technologies in mineral fibers production. Известия вузов. Физика. Декабрь 2012. Том 55, № 12/3.
22. **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.
23. **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.
24. Распределение температурных полей при плазменной обработке поверхности древесины / Г.Г. Волокитин, **О.Г. Волокитин**, В.В. Шеховцов, Е.А. Маслов, Н.В. Малюга // Вестник ТГАСУ. – 2013. – №3. – С. 220–227.
25. 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.
26. 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.

27. Физико-химические процессы, протекающие при плазмохимическом синтезе силикатных расплавов / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, **О.Г. Волокитин**, А.А. Заяц // Известия вузов. Физика. – Январь 2014. – № 3/3. – С. 111–114.
28. Волокитин, Г.Г. Электродуговые и электроплазменные устройства для переработки силикатсодержащих отходов / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, **О.Г. Волокитин**, В.В. Шеховцов // Известия вузов. Физика. – Январь 2014. – № 3/3. – С. 114–119.
29. 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.
30. **Volokitin, O.G.** Plasma treatment technology for silicate melt used in mineral fiber production / O.G. Volokitin, V.V. Shekhovtsov, Maslov E.A // Advanced materials research Vol.880 (2014). Pp. 233–236.
31. 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.
32. Волокитин, Г.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.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. **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.
 37. 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.
 38. 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.
 39. 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.
 40. Physical chemical studies of dispersed aluminosilicate wastes for obtaining the burned building materials / I.Y. Iuriev, N.K. Skripnikova, G.G. Volokitin, **O.G. Volokitin**, A.V. Lutsenko, P.V. Kosmachev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 71 (2015).
 41. Complex research of molybdenum ore tailings / G. Volokitin, N. Skripnikova, **O. Volokitin**, I. Iuriev, V. Shekhovcov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 71 (2015).
 42. 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.
 43. **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.
 44. **Волокитин, О.Г.** Melting processes of silica sand in low-temperature plasma technology / О.Г. Волокитин, В.И. Вереща-

- гин, В.В. Шеховцов // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2015. – Том 58. – № 1. – С. 62–65.
45. 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.