

На правах рукописи

Мяо Лун

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
НАГРЕВА И ИСПАРЕНИЯ ЧАСТИЦ КВАРЦА В ДИСПЕРСНОМ
ПОТОКЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА**

Специальность 01.04.14 –
Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Мяо Лун

Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Гришин Юрий Михайлович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Терехов Виктор Иванович**
доктор технических наук, профессор кафедры
технической теплофизики Федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Новосибирский государственный
технический университет»

Колесников Анатолий Федорович
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией взаимодействия
плазмы и излучения с материалами Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки «Институт проблем механики Российской
академии наук – ИПМех РАН»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Объединенный институт
высоких температур Российской академии наук
– ОИВТ РАН»

Защита состоится «27» мая 2020 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.08 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская набережная, д. 1, ф-т «Энергомашиностроение» ауд. 202Э.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.08.

Автореферат разослан « » 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.08
кандидат технических наук, доцент



Егоров К.С

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Кварцевое сырьё является стратегическим сырьём экономики РФ и используется для выплавки кварцевых стёкол, оптического стекловарения и производства солнечного и полупроводникового кремния. Существующие технологии переработки природного кварца позволяют использовать лишь четверть минерально-сырьевой базы кварцевого сырья РФ.

В настоящее время на мировом рынке наблюдается дефицит кварца повышенной чистоты (с содержанием примесей $<20 \text{ млн}^{-1}$) и кремния солнечного качества. Одним из направлений разработки новых эффективных технологий получения кремния и особо чистого кварца является использование электрических разрядов. Среди известных разрабатываемых методов весьма перспективным является метод получения поликристаллического кремния непосредственно из кварца, реализуемый путем испарения кварцевого концентрата в высокотемпературном аргоно-водородном потоке электрических разрядов и последующего неравновесного процесса связывания свободного кислорода с водородом. Для получения особо чистого кварца весьма эффективным является применение на финишном этапе технологии обработки кварцевого концентрата в высокотемпературной струе, генерируемой электрическими разрядами.

В обоих способах переработки кварца имеет место фаза нагрева и испарения (при получении кремния) или просто нагрева (при обогащении) твердых мелкодисперсных кварцевых частиц в высокотемпературном ($\sim 5 - 10 \text{ кК}$) газовом потоке, генерируемом электрическими разрядами различных типов. Именно эти теплофизические процессы являются особо важными, поскольку в известной степени определяют режимные параметры всей технологической установки и итоговую производительность.

При обработке кварцевого концентрата в электродуговом разряде всегда присутствуют пары и микрочастицы материала электродов, которые загрязняют получаемые продукты. Поэтому для получения особо чистого кварца и кремния высокой чистоты необходимо использование высокочастотных индукционных разрядов. Оценка возможности применения подобных разрядов в разрабатываемых технологиях связана, прежде всего, с изучением эффективности процессов нагрева и испарения частиц кварца в высокотемпературном потоке.

Однако к настоящему времени количественная информация о процессе испарения кварцевых частиц (при получении кремния), а также об условиях термобарического разрушения частиц кварца при нестационарном нагреве (при получении особо чистого кварца) в высокотемпературном газовом потоке индукционных разряда ограничена. Это обуславливает необходимость проведения широкого круга расчетных исследований указанных процессов.

Применение высокочастотного индукционного разряда в процессах нагрева и испарения кварцевых частиц требует определения основных газодинамических параметров и режимов течения высокотемпературного потока в канале разряда. В значительной степени от этих параметров зависят условия прохождения потока перерабатываемых частиц через зону энерговыделения. Известные данные указывают на формирование лобового вихря непосредственно пе-

ред зоной индуктора. Это вихревое течение может приводить к изменению направления движения нагреваемых частиц, поступающих из центрального канала-инжектора в зону разряда. В результате перерабатываемые частицы могут не попадать в высокотемпературное ядро разряда, а выходить из него, не достигнув требуемой температуры или соответствующего агрегатного состояния или разбрасываться на стенки установки.

К настоящему времени систематизированная информация о режимах вихревого течения в канале высокочастотного индукционного разряда практически отсутствует. Это вызывает необходимость проведения расчетно-теоретических исследований, направленных на изучение структуры вихревого течения в канале разряда и определение влияния на нее основных режимных и конструктивных параметров высокочастотного индукционного разряда.

Целью диссертационной работы являлась разработка расчетно-теоретических моделей вихревого течения, процессов нагрева и испарения кварцевых частиц в технологических высокочастотных индукционных установках переработки кварцевых частиц на кремний и особо чистый кварц и установление физических закономерностей управления теплофизическими параметрами высокотемпературного дисперсного потока.

Для достижения этой цели в работе были поставлены и решены **следующие задачи:**

1. Разработать и верифицировать физико-математическую модель расчета высокотемпературного газового потока в канале высокочастотного индукционного разряда с аргоновым и аргоно-водородным рабочими газами.
2. Выполнить комплекс расчетов и проанализировать влияние режимных и конструктивных параметров на газодинамические поля и режимы вихревого течения в канале высокочастотного индукционного разряда.
3. Разработать модель расчета теплофизических процессов нагрева и испарения кварцевых частиц в монодисперсных потоках в канале высокочастотного индукционного разряда.
4. Провести комплекс расчетов и выполнить анализ влияния рабочих параметров высокочастотного индукционного разряда, состава рабочего газа и условий подачи частиц на процессы испарения кварцевых частиц.
5. Разработать модель расчета процессов турбулентного смешения полидисперсного потока кварцевых частиц с высокотемпературным газом высокочастотного индукционного разряда.
6. Выполнить комплекс расчетов и определить влияние состава рабочего газа, расхода и способов подачи частиц на динамику нагрева и условия термобарического разрушения частиц кварцевой крупки.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые:

1. Установлено условие перехода лобового вихревого течения от режима типа Бенара в кольцевой режим по величине расхода газа через центральный канал-инжектор как функции мощности, частоты высокочастотного индукционного разряда, состава рабочего газа и способов подачи водорода.
2. Определены газодинамические параметры высокотемпературного газа, структуры и интенсивности вихревого течения в канале индукционного раз-

ряда с различными режимными и конструктивными параметрами.

3. Установлены зависимости степени испарения и удельных затрат энергии на испарение от мощности тепловыделения, размера и массового расхода частиц кварца, условий их подачи, состава рабочего газа и способов подачи водорода.
4. Определены условия термобарического разрушения кварцевых частиц с размером 0,1 – 0,4 мм при нестационарном нагреве полидисперсных потоков в высокочастотной индукционной установке.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается

- использованием обоснованных адекватных физико-математических моделей;
- применением сертифицированного программного комплекса ANSYS CFX с верификацией и валидацией на наборе задач, используемых для оценки качества разработанных физико-математических моделей, применяемых при расчётах;
- удовлетворительным согласием результатов работы и ее отдельных частей с известными (как численными, так и экспериментальными) данными других авторов.

Теоретическая и практическая ценность результатов работы состоит в том, что:

1. Теоретически обосновано применение высокочастотного индукционного разряда в технологиях переработки кварца на кремний и особо чистый кварц.
2. Разработаны модели расчета процессов нагрева и испарения кварцевых частиц, и определены рабочие параметры высокочастотного индукционного разряда в технологиях переработки кварца на кремний и особо чистый кварц.
3. Определены режимы подачи частиц с полным или частичным проникновением в высокотемпературную зону высокочастотного индукционного разряда в технологической установке переработки кварца на кремний.
4. Установлен рабочий диапазон массового расхода перерабатываемых частиц кварца и соответствующих удельных энергетических затрат для обеспечения термобарического разрушения полидисперсной системы кварцевых частиц в зависимости от состава рабочих газов и условий подачи частиц.
5. Даны рекомендации по выбору оптимальных режимных (мощности, расхода транспортирующего газа) и конструктивных параметров разряда и параметров (диаметра и массового расхода) потока частиц кварца.
6. Полученные расчетные данные являются основой для разработки и создания высокоэффективных технологий переработки кварца на кремний и особо чистый кварц с использованием высокочастотного индукционного разряда.

На защиту выносятся следующие положения диссертации:

1. Модели и результаты численного исследования и анализа режимов вихревого течения.
2. Модели и результаты численного исследования и анализа теплофизических процессов нагрева и испарения кварцевых частиц.

3. Модели и результаты численного исследования и анализа теплофизических процессов нагрева и условий термобарического разрушения кварцевых частиц с размером 0,1 – 0,4 мм.

Личный вклад автора состоит в том, что представленные результаты получены автором или при его непосредственном участии. Автором лично разработаны физико-математические модели и выполнены комплексные исследования газодинамических полей и режимов течения в канале высокочастотного индукционного разряда, процессов нагрева и испарения кварцевых частиц, процессов нагрева и термобарических разрушений кварцевых частиц.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на ряде Международных и Российских конференциях:

1. XIII Международная конференция по модификации материалов пучками частиц и потоками плазмы (EFRE, г. Томск, 2016 г.)
2. Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (г. Москва, 2017 г.);
3. IV Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (ЛапЛаз-2018, г. Москва, 2018 г.).
4. 7-ая Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-7, г. Москва, 2018 г.).
5. II Международной конференции «проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии» (РТПРЕ, г. Москва, 2019 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них 7 работ в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК РФ и 7 работ из Перечня международных научных изданий, включенных в базу данных Web of Science, Scopus, общий объем 7,9 п.л.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения и списка литературы из 136 наименований. Объем работы включает 190 страниц, 66 рисунков, 5 таблиц.

Содержание работы

Во введении отмечена актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, кратко изложено содержание глав диссертации, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов.

В главе 1 рассмотрены существующие и разрабатываемые технологии переработки кварцевого концентрата на особо чистый кварц и поликристаллический кремний.

Показано, что существующие технологии переработки кварцевого концентрата на финишном этапе технологического процесса получения особо чистого кварца (высокотемпературное хлорирование и флотация, и аэрохимическое обогащение) характеризуются многостадийностью, низкой производительностью и высокой экологической опасностью. Эффективным способом обогащения кварцевого концентрата является метод с использованием электрических разрядов, предложенный МГТУ им. Н.Э. Баумана и «Центркварц». Способ за-

ключается в специальной обработке кварцевого концентрата в высокотемпературной струе, генерируемой электрическими разрядами. Представлены результаты экспериментальных исследований метода с использованием дуговых электрических разрядов. На основании имеющихся экспериментальных данных показана прямая связь процессов разрушения кварцевых частиц (в процессе динамического нагрева в потоке) с эффективностью их обогащения.

Отмечено, что существующие технологии получения поликристаллического кремния характеризуются многостадийностью и высокой экологической опасностью. Среди разрабатываемых методов получения кремния перспективным является предложенный МГТУ им. Н.Э. Баумана и «Центркварц» метод прямого получения поликристаллического кремния непосредственно из кварца в высокотемпературном аргоно-водородном потоке, генерируемом электрическим разрядом. Приведены результаты экспериментальных исследований метода с использованием дугового электрического разряда.

Основным недостатком методов (МГТУ им. Н.Э. Баумана и «Центркварц») переработки кварцевого концентрата на особо чистый кварц и кремний в высокотемпературных потоках электродуговых разрядов является загрязнение получаемых продуктов материалами электродов. Для минимизации примесей в продуктах, необходимо перейти на использование высокочастотных индукционных разрядов с различными рабочими газами (аргон и аргоно-водородные смеси). Оценка эффективности использования данного типа разряда для технологий переработки кварцевого концентрата на поликристаллический кремний и особо чистый кварц может быть обоснована по результатам исследования газодинамических параметров потока и процессов нагрева и испарения кварцевых частиц в высокочастотных индукционных установках.

Проведен анализ известных исследований газодинамических полей и режимов течения в канале высокочастотного индукционного разряда, а именно, наличие лобового вихря перед зоной энерговыделения. Показано существенное влияние этой вихревой зоны на траектории и тепловые состояния твердых частиц, подаваемых через центральный канал-инжектор. Отмечено ограниченное количество исследований структур, режимов и параметров лобового вихревого течения в канале индукционного разряда.

Существует огромное количество расчетных и экспериментальных исследований процессов нагрева и испарения частиц различных материалов в высокотемпературном потоке индукционного разряда. Однако среди этих исследований практически нет работ по изучению динамики испарения частиц кварца и определению зависимости степени испарения частиц от рабочих параметров разряда, состава рабочего газа, размеров и условий подачи частиц. Минимально количество работ по исследованию нестационарного поля температуры и условий термобарического разрушения частиц кварцевой крупки при их динамическом нагреве в высокотемпературном потоке индукционного разряда.

Исходя из представленного обзора опубликованных работ, делается вывод о необходимости разработки методов расчета и проведения детального исследования структуры формирующегося в канале разряда вихревого течения; процесса испарения потока кварцевых частиц в высокотемпературном аргоновом и

аргоно-водородном потоках; определения условий термобарического разрушения крупки частиц кварца в специальных технологических установках с использованием высокочастотных индукционных разрядов.

Из всей возможной номенклатуры типов высокочастотных индукционных разрядов, в данной работе рассмотрен один из наиболее часто применяемых в технологиях переработки частиц или капель разрядов, а именно, высокочастотный индукционный разряд атмосферного давления с осевой подачей рабочих газов и с водоохлаждаемой внешней стенкой.

В главе 2 представлена сформулированная физико-математическая модель и результаты расчётов исследований газодинамических параметров и режимов течения высокотемпературного аргонового и аргоно-водородного потока в канале высокочастотных индукционных разрядов при атмосферном давлении.

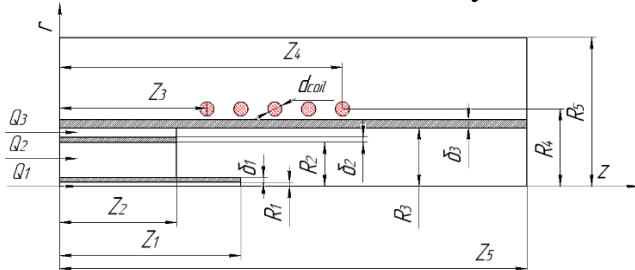


Рис. 1. Конфигурация высокочастотного индукционного разряда

Мощность джоулева тепловыделения и частота тока разряда варьируются в пределах $P = 2,5 - 15$ кВт и $f = 1 - 13,56$ МГц.

В качестве рабочих газов рассмотрены аргон и аргоно-водородные смеси с различными объемными долями водорода ($\varphi = 0 - 20\%$) и способами подачи водорода. Транспортирующий $Q_1 = 0,05 - 6$ л/мин, плазмообразующий $Q_2 = 3,4 - 10$ л/мин и охлаждающий $Q_3 = 31 - 60$ л/мин газы подаются по оси в цилиндрический канал.

Модель расчета газодинамических параметров стационарного дозвукового газового потока в канале высокочастотного индукционного разряда включала систему уравнений Максвелла (без учета тока смещения) и систему уравнений газодинамики многокомпонентной газовой смеси с учетом действия электромагнитных сил, джоулева тепловыделения и потери энергии с излучением.

Предполагалось, что спиральный индуктор представляет собой параллельные кольца. Течение рабочих газов на входах во все коаксиальные каналы являлось азимутально симметричным. Выполнение этих допущений позволяет рассматривать электромагнитные и газодинамические процессы как осесимметричные - двухмерные в цилиндрической системе координат (r, θ, z) .

На основание проведенных оценок чисел Re в различных частях высокочастотного индукционного разряда, которые оказываются ниже соответствующих критических значений при записи системы уравнений газодинамики предполагается, что течение потока в канале разряда является ламинарным.

Высокотемпературный газовый поток является оптически тонким, так что поглощением излучения в газе можно пренебречь. На основание проведенных оценок времени релаксации считали, что рабочий газ находится в состоянии ло-

Численное моделирование проведено для технологической установки типа PL-50, схема которой представлена на Рис. 1. При вариации числа витков N ($N = 3 - 5$) длина индуктора $l_{coil} = Z_4 - Z_3$ составляет 60 мм, а длина канала $Z_5 = 400$ мм. Координата выходного сечения центрального канала – инжектора $Z_1 = 3 - 100$ мм.

кального термодинамического равновесия. Расчет поля концентрации водорода в канале аргоно-водородного разряда осуществляется методом комбинированной диффузии, предложенным А.В. Murphy, при допущении локального химического равновесия. Для определения теплофизических и оптических свойств высокотемпературного аргона и аргоно-водородных смесей использованы известные справочные данные М.И. Boulos.

Решение полученной системы уравнений, дополненной соответствующими краевыми условиями, выполнено численно методом конечных объемов в программном комплексе вычислительной гидродинамики ANSYS CFX 17.2. Расчетные области включают области, занятые высокотемпературным газом, стенками каналов, витками индуктора и неподвижным окружающим воздухом. Количество элементов структурных сеток в газовой области и области стенок каналов равно 80×400 и 1000, соответственно. Количество элементов неструктурных сеток в областях витков индуктора и окружающего воздуха равно 10151 – 12000 и 72477 – 73276, в зависимости от количества витков.

Проведена валидация разработанной модели расчета электромагнитных и газодинамических полей в канале высокочастотного индукционного разряда аргона путем сравнения с известными численными результатами. Показано, что максимальное различие распределений температуры, осевой компоненты скорости и магнитного напряжения составляет около 5 – 10%.

Рассчитаны поля газодинамических параметров газового потока в канале высокочастотного индукционного разряда. Выявлено наличие лобового торообразного вихря (Рис. 2) перед зоной энерговыделения. Установлено, что габариты и интенсивность $\Gamma_v = \iint \Omega \cdot ds$ лобового вихря уменьшаются с увеличением частоты тока разряда f и уменьшением мощности джоулева тепловыделения P . Показано, что увеличение расхода транспортирующего газа так же приводит к сокращению габаритов вихря и снижению его интенсивности.

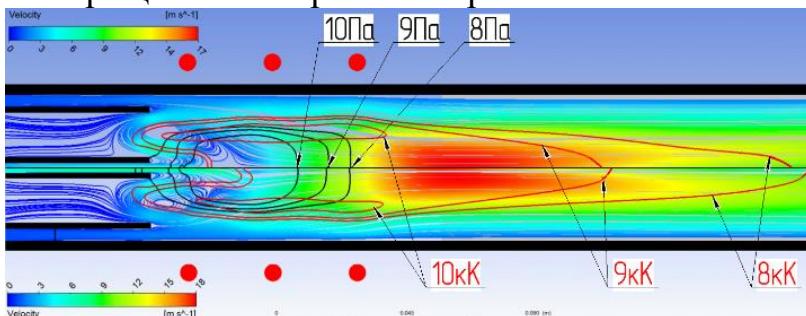


Рис. 2. Линии тока, изолинии избыточного давления и температуры аргонового потока: $Q_1 = 1,4$ л/мин – верхняя; $Q_1 = 2,5$ л/мин – нижняя.

вихрем (Рис. 2, верхняя полуплоскость). В результате образуется лобовой торообразной вихрь без осевой полости – вихрь типа Бенара. При увеличении величины Q_1 образуется кольцевой вихрь с осевой полостью, и в этом случае скорость газа вдоль оси в зоне разряда всегда положительна (Рис. 2, нижняя полуплоскость). Таким образом, при определенной (критической $Q_{1,cr}$) величине

Обнаружено, что в зависимости от расхода транспортирующего газа Q_1 в канале индукционного разряда могут формироваться два разных типа лобового вихря. Когда величина Q_1 относительно невелика, весь газ из центрального канала-инжектора захватывается

расхода транспортирующего газа происходит изменение типа лобового вихря от Бенарного к кольцевому.

Численно определены зависимости критического расхода транспортирующего газа $Q_{1,cr}$ от мощности тепловыделения P и частоты тока разряда f (Рис. 3, сплошные линии). Установлено, что с увеличением P и уменьшением f величина $Q_{1,cr}$ монотонно возрастает.

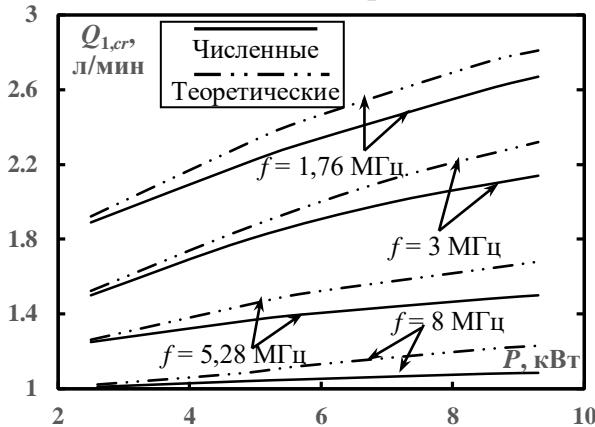


Рис. 3. Зависимости $Q_{1,cr}$ от мощности тепловыделения P при $Z_1 = 50$ мм для индукционного разряда с аргоном.

ских и численных результатов (Рис. 3) может быть использована для определения $Q_{1,cr}$ в аргоновых индукционных разрядах с различными геометрическими и энергомощностными параметрами.

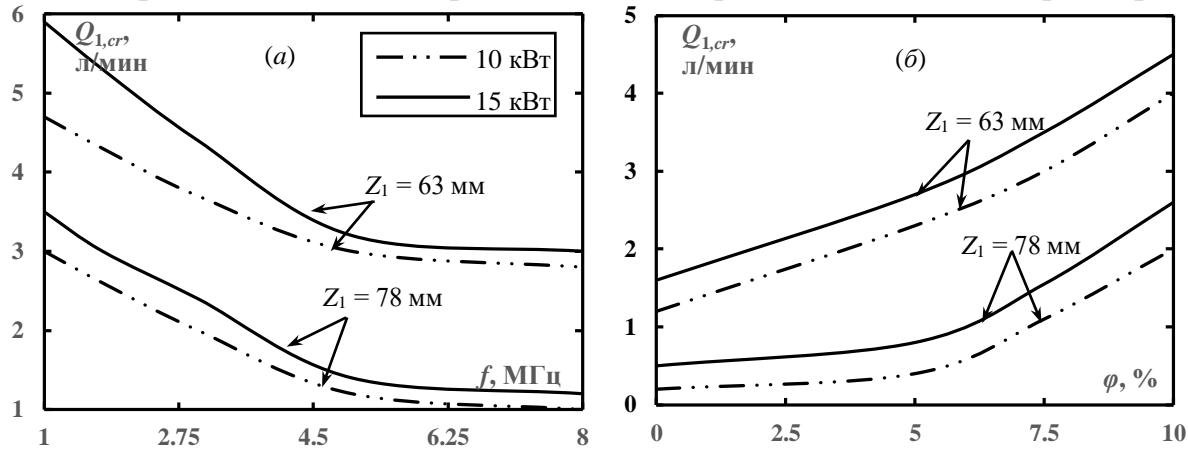


Рис. 4. Зависимости $Q_{1,cr}$ от f при $\varphi = 10\%$ (а) и $Q_{1,cr}$ от φ при $f = 3$ МГц (б).

Изучены газодинамические поля и режимы вихревого течения в канале аргоно-водородного разряда с пятивитковым индуктором при $P = 10 - 15$ кВт и $f = 1 - 10$ МГц. Средняя объемная доля водорода в рабочих газах изменяется в диапазоне $\varphi = 0 - 20\%$. Транспортирующий газ с расходом $Q_1 = 0,05 - 6$ л/мин вводится в зону разряда через инжектор при $Z_1 = 50 - 90$ мм. Обнаружено, что в аргоно-водородных смесях увеличение объемной доли водорода φ от 0 до 20% приводит к сокращению протяженности высокотемпературной зоны в 1,5 – 2 раз, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Определено влияние мощности тепловыделения P , частоты тока разряда f , объемной доли водорода φ и координаты выходного сечения инжектора Z_1 на

теоретически проанализировано условие перехода лобового вихревого течения с вихрем типа Бенара в режим с кольцевым вихрем. На основе баланса действующих сил получена формула для определения зависимости величины критического расхода $Q_{1,cr}$ от мощности тепловыделения P , частоты тока разряда f и внутреннего диаметра инжектора d_{inj} :

$$Q_{1,cr} = \frac{\beta 3\pi \mu_{max} d_{inj}}{\rho} \left(\sqrt{1 + \frac{\alpha \rho d_{inj}^2 P}{72 \beta^2 \mu_{max}^2 f^{1/2}}} + 1 \right).$$

Удовлетворительное совпадение теоретического и численного результатов доказывает, что предложенная формула для определения $Q_{1,cr}$ в аргоновых индукционных разрядах с различными геометрическими и энергомощностными параметрами.

величину $Q_{1,cr}$ (Рис. 4). Выявлено, что как для аргонового газа, так и для аргоно-водородной смеси, увеличение мощности тепловыделения и уменьшение частоты тока разряда приводят к возрастанию величины $Q_{1,cr}$ (Рис. 3, Рис. 4, а).

Установлено, что значение $Q_{1,cr}$ увеличивается в 3 – 5 раза при возрастании объемной доли водорода φ от 0 до 10%. Показано, что изменение координаты положения выходного сечения инжектора Z_1 от сечения первого витка ($Z_1 = 63$ мм) до второго витка ($Z_1 = 78$ мм) может привести к снижению $Q_{1,cr}$ на 1 л/мин (при $\varphi = 0\%$) и на 2 – 2,5 л/мин (при $\varphi = 6 – 10\%$).

Изучено влияние способов подачи водорода на газодинамические поля и режимы вихревого течения в канале разряда с аргоно-водородной смесью. Рассмотрено два способа подачи водорода: через центральный или периферийный щелевой каналы. Установлено, что подача водорода через периферийный щелевой канал позволяет уменьшить величину $Q_{1,cr}$ в 4 – 5 раз, по сравнению со значением $Q_{1,cr}$ при подаче водорода через центральный канал. При этом обеспечивается тепловой режим с более высокой температурой потока в районе оси высокочастотного индукционного разряда, что может оказаться важным при переработки твердых частиц, подаваемых через центральный канал.

В главе 3 представлена физико-математическая модель и результаты численных исследований процессов испарения кварцевых частиц в высокотемпературном потоке в канале высокочастотных индукционных разрядов с аргоно-вом и аргоно-водородном рабочими газами при атмосферном давлении.

Численное моделирование проведено для технологической установки типа PL-50, схема (Рис. 1), основные параметры которой представлены в главе 2. Изучены режимы, в которых транспортирующий газ через центральный канал-инжектор ($Z_1 = 50 – 90$ мм) обеспечивал подачу в разряд дисперсного потока кварцевых частиц с массовым расходом $G_{SiO_2} = 1 \cdot 10^{-6} – 5 \cdot 10^{-4}$ кг/с.

При формулировке расчетной модели считали, что частицы имеют сферическую форму и одинаковый начальный диаметр d_{p0} из диапазона 10 – 100 мкм. При указанных расходах объемная концентрация частиц меньше 10^{-3} , и течение монодисперсного потока кварцевых частиц может быть отнесено к классу разреженных течений, в которых взаимодействием частиц между собой можно пренебречь. При характерном масштабе времени пребывания частицы в потоке $t \sim 10^{-2}$ с, температура в кварцевых частицах размером менее 100 мкм фактически является равномерно распределенной.

Исследование стационарного дозвукового течения монодисперсного кварцевого потока в высокотемпературном газе проведено в рамках магнитно-гидродинамической многокомпонентной гетерогенной модели при наличии нагрева и испарения частиц. Течение газового потока для указанных режимных и конструктивных параметров считается ламинарным (см. гл. 2). Считали, что электромагнитные и газодинамические процессы можно рассматривать как осесимметричные-двуухмерные в цилиндрической системе координат.

Полная система уравнений включала систему уравнений Максвелла; систему уравнений многокомпонентной магнитной гидродинамики с учетом влияния частиц, электромагнитных сил, джоулема тепловыделения и излучения; систему уравнений движения и тепломассообмена дисперсной фазы.

В рамках дискретно-траекторного «particle source in cell» подхода движение и тепломассообмен дисперсной фазы рассчитывается по совокупности решений для пробных частиц с k точками «старта» в выходном сечении центрального канала-инжектора.

Расчет испарения частиц приведен в рамках диффузионного приближения с применением квазистационарной модели газодинамического испарения при достижении частицы температуры точки кипения. При допущении локального химического равновесия системы расчет поля концентрации всех компонентов (SiO_2 , SiO , Si , O , H_2 , H) газовой смеси осуществляется методом комбинированной диффузии с использованием программного комплекса TERRA.

Проведено сравнение результатов по разработанной численной модели и экспериментальных данных по динамике испарения твердых частиц кварца и корунда (с $d_{p0} = 17$ мкм) в аргоновом разряде ($P = 3$ кВт и $f = 27$ МГц). Результаты расчетов и экспериментов удовлетворительно совпадают.

Исследовано влияние массового расхода G_{SiO_2} и начального диаметра d_{p0} частиц на процесс испарения кварца в канале аргонового разряда с трехвитковым ($N = 3$) индуктором при $P = 5 - 10$ кВт и $f = 3$ МГц. Рассмотрены три различных способа инжекции частиц в поток из выходного сечения центрального канала: осевая инжекция, конусная инжекция и кольцевая конусная инжекция. Угол раскрытия варьировался в диапазоне $\theta = 0 - 10^0$.

Показано, что условием, обеспечивающим осуществление режима течения дисперсной смеси с фронтальным вихрем кольцевой формы, через осевую полость которого протекает основная часть потоков транспортирующего газа и все частицы кварца (без захвата их в вихревое движение) является превышение значения расхода транспортирующего газа Q_1 критической величины $Q_{1,cr}$. Указанное условие реализации режима с полным проникновением частиц в высокотемпературную зону разряда имеет место, как при осевой инжекции частиц, так и при конусной инжекции с углом раскрытия в пределах $\theta \leq 6^0$ (Рис. 5, поз. 2).

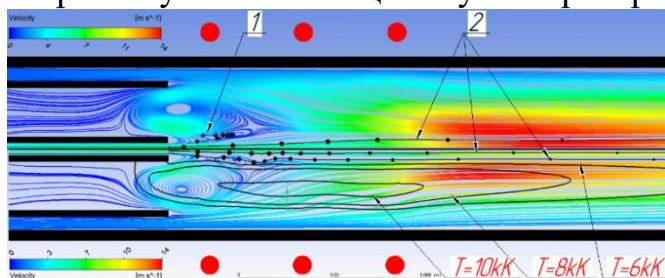


Рис. 5. Линии тока, изолинии температуры аргонового потока и траектории частиц: 1 – $\theta = 8^0$; 2 – $\theta = 6^0$.

Проведены расчеты степени испарения ε_{ek} на выходе канала ($z = Z_5$) и удельных затрат энергии η на испарение частиц по формулам: $\varepsilon_{ek}(Z_5) = G_{\text{SiO}_2,g}(Z_5) / G_{\text{SiO}_2}$, $\eta = P / [\varepsilon_{ek}(Z_5) G_{\text{SiO}_2}]$, где $G_{\text{SiO}_2,g}(Z_5)$ – массовый расход пара в выходном сечении канала.

Найдено, что изменение мощ-

ности джоулева тепловыделения в диапазоне $P = 5 - 10$ кВт практически не влияет на степень испарения частиц. Показано, что при $P = 5$ кВт и $G_{\text{SiO}_2} \leq 1 \cdot 10^{-6}$ кг/с полностью испаренными могли бы быть кварцевые частицы с размером $d_{p0} = 90 - 110$ мкм. При $G_{\text{SiO}_2} \geq 3 \cdot 10^{-5}$ кг/с полностью могут испариться только частицы с $d_{p0} \leq 50$ мкм (за счет влияния эффекта «загрузки», то есть, за счет уменьшения температуры газа при смешении с частицами). Поэтому для кварцевых частиц с заданным исходным диаметром d_{p0} существует максимальный

расход $G_{\max}(d_{p0})$, при котором все частицы могут полностью испариться на выходе канале (Рис. 6, *a*).

Найдено, что степень испарения частиц возрастает при конусной или кольцевой конусной инжекции в результате снижения эффекта «загрузки». Для кварцевых частиц $d_{p0} = 50$ мкм, степень испарения на выходе канала может быть в 2 раз увеличена при изменении угла раскрытия от нуля до 6^0 .

Даны рекомендации по выбору оптимальных режимных параметров разряда и параметров потока перерабатываемых частиц кварца. Обнаружено, что величина удельных затрат энергии на испарения η имеет минимум η_{\min} при некотором значении массового расхода частиц $G_{\text{SiO}_2} = G_{\text{opt}}$.

Определена область оптимальных режимных параметров потока испаряемых частиц где $G_{\text{opt}}(d_{p0}) = G_{\max}(d_{p0})$. Установлено, что при осевой инжекции частиц размером около 30 мкм оптимальный массовым расходом должен составлять $G_{\text{SiO}_2} = G_{\max} \approx G_{\text{opt}} = 3 \cdot 10^{-5}$ кг/с. В этих условиях можно обеспечить полное испарение кварцевых частиц с минимальными энергозатратами $\eta_{\min} \approx 90$ МДж/кг.

Установлены зависимости величины G_{\max} , G_{opt} и η_{\min} от угла раскрытия при конусной и кольцевой конусной инжекциях (Рис. 6, *б*). Доказано, что для систем инжекции частиц с $\theta = 6^0$ разряд мощностью около 5 кВт обеспечивает полное испарение частиц кварца с размерами до 50 – 70 мкм с расходом до $(8 - 10) \cdot 10^{-5}$ кг/с при удельных энергетических затратах на уровне 50 МДж/кг.

Изучен процесс испарения частиц кварца в канале аргоно-водородного разряда с пятивитковым ($N = 5$) индуктором при $P = 14$ кВт и $f = 3$ МГц. Рассмотрено два различных способа подачи водорода: через центральный или периферийный щелевой каналы.

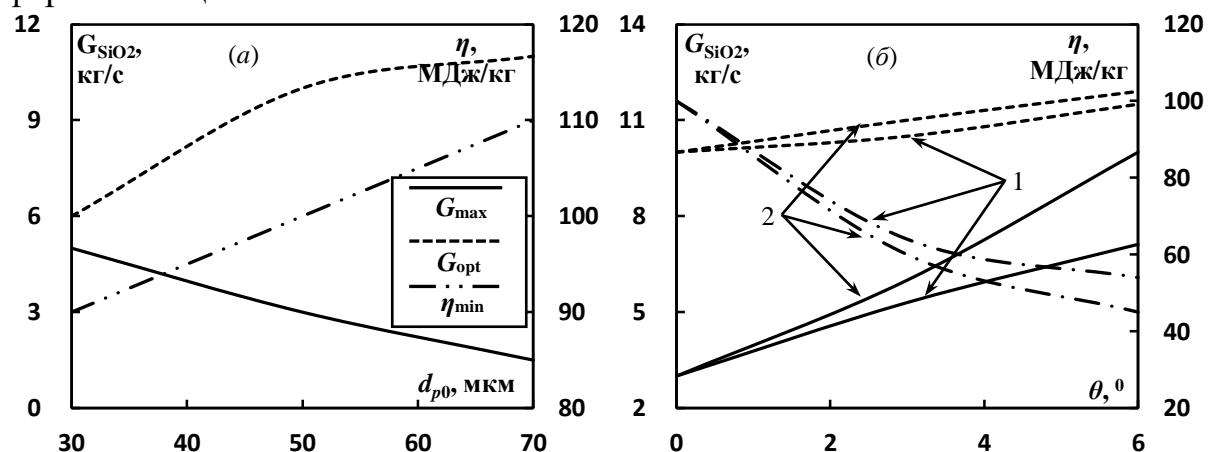


Рис. 6. Зависимости G_{\max} , G_{opt} и η_{\min} от d_{p0} (*а*, осевая инжекция) и θ (*б*, $d_{p0} = 50$ мкм: 1 – конусная инжекция; 2 – кольцевая конусная инжекция) в Ar газе при $Z_1 = 50$ мм и $Q_1 = 2,2$ л/мин.

Установлено, что добавка водорода при увеличении φ от 0 до 5% может приводить к росту степени испарения частиц кварца ε_{ek} почти в 2 – 3 раз. А в диапазоне $\varphi = 5 - 10\%$ изменение значений ε_{ek} и η несколько меньше (Рис. 7).

Определено влияние способов подачи водорода на процесс испарения частиц. Показано, что при подаче водорода через центральный канал величина ε_{ek} может быть на 5 – 20% меньше, чем при подаче водорода через периферийный щелевой канал.

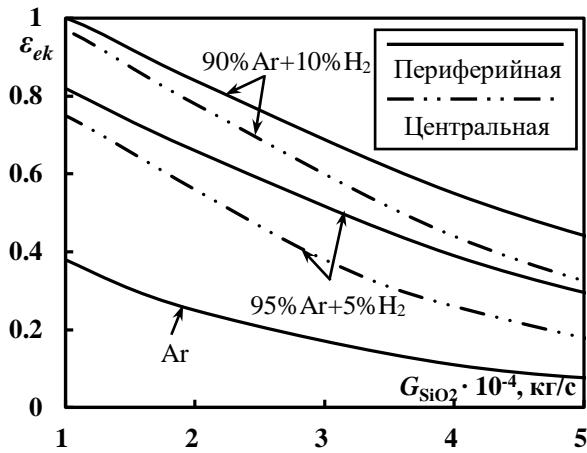


Рис. 7. Зависимости ε_{ek} от G_{SiO_2} для частиц $d_{p0} = 75$ мкм при осевой инжекции в канале Ar-H₂ разряда при $Z_1 = 78$ мм и $Q_1 = 3,5$ л/мин.

транспортирующего газа Q_1 и смещение координаты выходного сечения инжектора Z_1 к середине зоны индуктора приводят к снижению степени испарения частиц за счет сокращения времени пребывания частиц в высокотемпературной зоне. Найдено, что при изменении величины Z_1 от 82 до 92 мм и Q_1 от 3,5 до 5,5 л/мин, степень испарения кварца может уменьшиться на 10 – 15%.

Установлено, что при оптимальных условиях подачи частиц с координатой инжектора $Z_1 = 82$ мм, расходом транспортирующего газа $Q_1 = 3,5$ л/мин и углом раскрытия $\theta = 15^0$, индукционный разряд с аргоно-водородным рабочим газом мощностью около 15 кВт обеспечивает полное испарение потоков кварцевых частиц с размерами до 50 – 75 мкм с расходом до $(1,5 – 2,5) \cdot 10^{-4}$ кг/с при удельных энергетических затратах на уровне 70 МДж/кг.

В главе 4 представлена физико-математическая модель турбулентного смешения полидисперсного потока кварцевых частиц с потоком, создаваемым высокочастотным индукционным разрядом в установке для обогащения кварцевого концентрата (Рис. 8). Изучена динамика нагрева и возникающих термобарических напряжений в частицах кварца.

Система для осуществления плазменного метода тепловой обработки кварцевого концентрата представляет собой вертикально расположенный высокочастотный индукционный разряд и непосредственно подсоединеный к внешней колбе разряда цилиндрический корпус камеры смешения (Рис. 8). Кварцевая крупка (с стандартными размерами $d_p = 0,1 – 0,4$ мм и расходом $G_{SiO_2} = 1 \cdot 10^{-4} – 2 \cdot 10^{-2}$ кг/с) вводится в камеру смешения потоком транспортирующего газа с расходом $Q_1 = 100 – 360$ л/мин через кольцевой канал под углом ввода $\vartheta = 10 – 80^0$ к оси системы (Рис. 8, поз. 1). Разряд с трехвитковым индуктором (Рис. 8, поз. 6) работает при мощности джоулема тепловыделения $P = 7$ кВт и частоте $f = 3$ МГц. Плазмообразующий и охлаждающий газы с объемными расходами соответственно $Q_2 = 8$ л/мин, $Q_3 = 90$ л/мин по оси подаются в канал разряда (Рис. 8, поз. 2 и 3). В качестве рабочих газов рассмотрены аргон и его смеси с водородом при варьировании средней объемной доли водорода $\varphi = 0 – 5\%$.

Исследовано влияние начального диаметра d_{p0} частиц и условий подачи частиц (координаты инжектора Z_1 , расхода транспортирующего газа Q_1 и угла раскрытия θ) на процесс испарения кварцевых частиц в канале аргоно-водородного разряда.

Найдено, что при массовом расходе $G_{SiO_2} \leq 1 \cdot 10^{-4}$ кг/с наиболее существенное влияние на степень испарения частиц оказывает его начальный диаметр, а при относительно большом массовом расходе частиц $G_{SiO_2} \geq 3 \cdot 10^{-4}$ кг/с наиболее существенное влияние оказывает угол раскрытия инжектируемых частиц.

Показано, что увеличение расхода

В камере смешения холодный полидисперсный поток транспортирующего газа с кварцевыми частицами смешивается с потоком, генерируемым высокочастотным индукционным разрядом. Задачей является установление условий термобарического разрушения всех кварцевых частиц с различными размерами ($d_p = 0,1 - 0,4$ мм) при их одновременном нестационарном нагреве в высокотемпературном потоке до температур ниже точки плавления материала кварца.

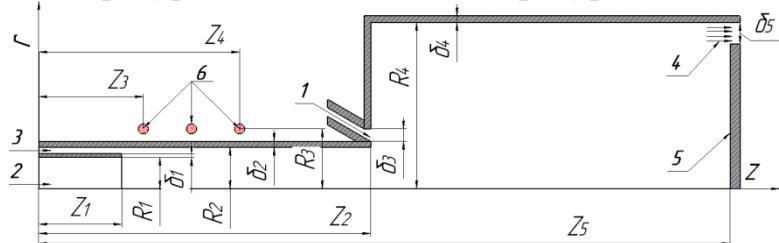


Рис. 8. Схема установки для обогащения кварцевого концентрата.

частиц в любом элементарном интервале диаметра $d_p + \delta d_p$ из диапазона $d_p = 0,1 - 0,4$ мм. Рассматриваются лишь режимы, при которых можно пренебречь плавлением и испарением частиц кварца, и их разрушением внутри потока. Как показали оценки, при указанных расходах течение полидисперсного потока кварцевых частиц может быть отнесено к классу разреженных течений, в которых взаимодействием частиц между собой можно пренебречь.

Течение полидисперсного кварцевого потока проведено в рамках магнитно-гидродинамической многокомпонентной гетерогенной модели. Для расчета смешения дисперсного газового потока с потоком из канала индукционного разряда использована стандартная k - ε турбулентная модель.

Полная система уравнений включала систему уравнений Максвелла и многокомпонентной магнитно-газодинамики с учетом влияния дисперсной фазы, уравнений движения и нагрева частиц в высокотемпературном потоке, а также уравнений Фурье-Кирхгофа и деформационного равновесия для определения пространственно-временного изменения температуры и термобарического напряжения внутри частиц.

Система уравнений движения и теплообмена дисперсной фазы решена в рамках дискретно-траекторного (PSI-CELL) метода расчета по совокупности решений для пробных частиц с k точками «старта» в выходном сечении кольцевого канала подачи частиц кварца.

Для решения задачи предложен и обоснован на тестовых расчетах приближенный двухэтапный подход. На первом этапе осуществляется расчет процесса смешения полидисперсного потока с высокотемпературным газом в предположении равномерного распределения температуры в частицах. На втором этапе полученные результаты о зависимости средней температуры частиц от времени применяются в качестве граничного условия на поверхности частиц для расчета пространственно-временного изменения температуры и термобарического напряжения.

Найдено, что протяженность камеры смешения должна быть не менее 1,6 м, чтобы температура газового потока на поверхности сборника (Рис. 8, поз. 5)

При формулировке расчетной модели считали, что частицы кварца имеют сферическую форму. Предполагали, что распределение обрабатываемых частиц по диаметру d_p соответствует условию одинаковости массы

не превышала 370 К. Проведен анализ динамики нагрева частиц кварца и возникающих в них полей термического напряжения $\sigma_{\text{экв}}^T$. Определены условия разрушения частиц кварца, при которых максимальное значение эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв}}^{\max}$ в центре частицы (рассчитываемое по теории Мора) становится выше предела прочности материала ($\sigma_{\text{экв}}^{\max} \geq \sigma_t = 50$ МПа).

Показано, что применение аргоновых индукционных разрядов малоэффективно для одновременного термического разрушения кварцевых частиц всех размеров из диапазона $d_p = 0,1 - 0,4$ мм: частицы $d_p = 0,1$ мм перегреваются выше температуры плавления кварца, а величина $\sigma_{\text{экв}}^{\max}$ в крупных частицах $d_p = 0,3 - 0,4$ мм всего меньше предела прочности.

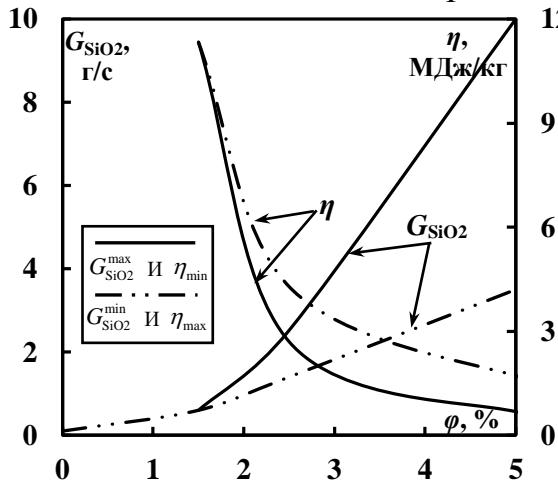


Рис. 9. Зависимости $G_{\text{SiO}_2}^{\max}$ и η_{\min} , $G_{\text{SiO}_2}^{\min}$ и η_{\max} от объемной доли водорода φ при $Q_1 = 180$ л/мин и $\vartheta = 60^0$.

массового расхода кварцевых частиц, а также соответствующих значений максимальных η_{\max} и минимальных η_{\min} удельных затрат энергии от объемной доли водорода (Рис. 9). Показано, что высокочастотный индукционный разряд мощностью около 7 кВт может обеспечивать условия разрушения всех кварцевых частиц с расходом из диапазона $4 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$ кг/с (при $\varphi = 5\%$).

Исследовано влияние направления ввода частиц ϑ и расхода транспортирующего газа Q_1 на условия термического разрушения частиц. Определены оптимальные величины ϑ_{opt} и $Q_{1,opt}$, при которых величина $\sigma_{\text{экв}}^{\max}$ в частицах наиболее большая ($\sigma_{\text{экв}}^{\max} \propto T_p \cdot \nabla T_p$). Найдено, что величины ϑ_{opt} и $Q_{1,opt}$ находятся в диапазоне $45^0 - 60^0$ и $160 - 220$ л/мин.

Исследовано влияние наличия вакуоли с газожидкостными включениями на условия комплексного термобарического разрушения частиц ($\sigma_{\text{экв}}^{TP} = \sigma_{\text{экв}}^T + \sigma_{\text{экв}}^P$), обусловленные совместным действием термического напряжения $\sigma_{\text{экв}}^T$ и давлением $\sigma_{\text{экв}}^P$ нагреваемых газожидкостных включений. При формулировке расчетной модели считали, что единственный вакуоль расположен

Рассмотрено использование аргоно-водородных смесей в качестве рабочих газов для осуществления режима нестационарного нагрева частиц с большими градиентами температуры, а следовательно, реализации процесса их термического разрушения. Показано, что в аргоно-водородных смесях нагрев в режимах достижения предела прочности во всех частицах без плавления, может осуществляться только при объемной доле водорода $\varphi \geq \varphi_{cr} = 1,5 - 2\%$ и расходами кварцевых частиц в определенном диапазоне граничных значений $G_{\text{SiO}_2}^{\min} < G_{\text{SiO}_2} < G_{\text{SiO}_2}^{\max}$ (Рис. 9). Определены зависимости минимального $G_{\text{SiO}_2}^{\min}$ и максимального $G_{\text{SiO}_2}^{\max}$

в центре частицы и имеет диаметр $(d_b / d_p)^3 \ll 1$. Основными компонентами газожидкостных включений в вакуоли являются вода и углекислый газ.

Определены зависимости от газо-содержания X (объем газа к объему вакуоля) температуры барического разрушения $T_{\text{разр}}^P(X)$, при которой величина максимального напряжения в вакуоли превышает допустимый порог σ_t и частица будет разрушена. Получены данные о величине расхода перерабатываемых частиц кварца, и возможных значениях газо-содержания X в газожидкостных включениях для обеспечения термобарического разрушения всех частиц размером из диапазона $d_p = 0,1 - 0,4$ мм.

Показано, что «рабочий» диапазон газо-содержания в кварцевых концентратах при их обогащении в аргоновом газе составляет $X \leq 0,2$, а в аргоно-водородной смеси ($\varphi = 5\%$) – $X \leq 0,4$. В частности, при наличии газожидкостных включений с $X = 0,1$ величина максимально перерабатываемого расхода кварцевого концентрата может увеличиваться в 1,6 – 4 раза.

Основные выводы

1. На основе комплекса численных исследований изучены и количественно определены структурные, тепловые и газодинамические характеристики вихревых течений в канале высокочастотного индукционного разряда при различных режимных и конструктивных параметрах.
2. Впервые установлено условие перехода лобового вихревого течения с вихрем типа Бенара в режим с кольцевым вихрем по величине расхода газа через центральный канал-инжектор как функции мощности и частоты индукционного разряда, состава рабочих газов, диаметра и места расположения выходного сечения центрального канала-инжектора.
3. Впервые установлено, что при превышении значения расхода транспортирующего газа критической величины, имеет место полное проникновение частиц в высокотемпературную зону разряда, как при осевом, так и при конусном вводе частиц с углом раскрытия меньше определенного значения.
4. Установлены зависимости степени испарения и удельных затрат энергии на испарение монодисперсного потока частиц кварца от мощности тепловыделения в разряде, состава рабочего газа, размера и массового расхода частиц и условия их подачи. Показано, что применение конусного ввода частиц и добавка водорода в аргоновый поток может эффективно повысить степень испарения частиц. Даны рекомендации по выбору оптимальных режимных параметров потока испаряемых частиц.
5. Впервые определено влияние способов подачи водорода в аргоновый поток на газодинамические поля, режимы вихревого течения и процесс испарения частиц кварца. Установлено, что по сравнению с подачей водорода через центральный канал, его подача через периферийный щелевой канал приводит к снижению величины критического расхода транспортирующего газа в 4 – 5 раз и повышению степени испарения частиц на 5% – 20%.
6. Для эффективного термобарического разрушения кварцевых частиц с размером 0,1 – 0,4 мм в установке с высокочастотным индукционным-разрядом

доказана необходимость использования аргоно-водородных рабочих газов при объемной доле водорода $\varphi \geq \varphi_{cr} = 1,5 - 2\%$ и расходами кварцевых частиц в определенном диапазоне граничных значений.

7. Впервые получены данные о величине расхода перерабатываемых частиц кварца, и возможных значениях газо-содержания в газожидкостных включениях для обеспечения термобарического разрушения всех частиц размером из диапазона $d_p = 0,1 - 0,4$ мм.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Miao L., Grishin Yu. M. Studies of vortex characteristics and gas-dynamic fields in Ar-H₂ inductively coupled plasma // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. V. 144. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118671>. (дата обращения 09.09.2019 г.). (1,39 п.л./0,69 п.л.).
2. Miao L., Grishin Yu. M. Numerical investigation into the characteristics of a vortex in an argon inductively coupled plasma// Plasma Sources Science and Technology. 2018. V. 27 № 11. P. 115008-115018. (1,27 п.л./0,63 п.л.).
3. Мяо Л., Гришин Ю.М. О структуре и интенсивности вихря в аргоновой плазме ВЧИ-плазмотрона // Физика Плазмы. 2018. Т. 44. № 11. С. 1-7. (0,81 п.л./0,40 п.л.).
4. Гришин Ю.М., Мяо Л. Об особенностях структуры плазменного потока в канале ВЧИ-плазмотрона с осевой подачей газа // Прикладная Физика. 2016. № 4. С. 33-38. (0,69 п.л./0,34 п.л.).
5. Гришин Ю.М., Мяо Л. О вихревом режиме аргоно-водородного плазменного потока в канале ВЧИ-плазмотрона // Прикладная Физика. 2017. № 3. С. 31-36. (0,69 п.л./0,34 п.л.).
6. Гришин Ю.М., Мяо Л. Диаграмма режимов течения плазмы аргона в канале ВЧИ-плазмотрона// Прикладная Физика. 2018. № 2. С.15-20. (0,69 п.л./0,34 п.л.).
7. Grishin Yu.M., Miao L., Borisov L.A., Serykh N.M., Kulagin A.Yu. Applications of two electric arc plasma torches for the preparation of high purity quartz // International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. 2019. V. 26. № 3. P. 267-273. (0,81 п.л./0,25 п.л.).
8. Гришин Ю.М., Мяо Л. Численное моделирование тепломассообмена в двухфазных монодисперсных кварцевых потоках в канале ВЧИ-плазмотрона // Сборник трудов Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-7). Москва. 22-26 октября 2018 г. С. 47-51. (0,58 п.л./0,39 п.л.).
9. Гришин Ю.М., Мяо Л. Численное моделирование плазмодинамических процессов в технологическом ВЧИ-плазмотроне с осевой подачей газа // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 5. С. 104-121. (2,10 п.л./1,05 п.л.).
10. Мяо Л., Гришин Ю.М. Об условиях образования и параметрах вихревого течения плазмы в канале ВЧИ-плазмотрона // Наука и Образование. МГТУ

- им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 8. С. 50-66. (1,96 п.л./0,98 п.л.).
11. Гришин Ю.М., Мяо Л. Эффективность испарения кварцевых частиц в аргоновом потоке плазмы ВЧИ-плазмотрона // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. № 5. С. 119-139. (2,43 п.л./1,21 п.л.).
12. Grishin Yu.M., Miao L. Numerical study of heating and evaporation processes of quartz particles in RF inductively coupled plasma // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 830. № 012069. (0,69 п.л./0,34 п.л.).
13. Grishin Yu.M., Miao L. Numerical simulation of the argon-hydrogen plasma flow in the channel of RF inductively coupled plasma torch // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 891. № 012302. (0,58 п.л./0,29 п.л.).
14. Grishin Yu.M., Miao L. About the influences of gas composition and generator frequency on the formation conditions and parameters of vortex tube in the RF inductively coupled plasma // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1238. № 012044. (0,69 п.л./0,34 п.л.).
15. Grishin Yu.M., Miao L. The application of RF inductively coupled plasma torch for the enrichment of natural quartz // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1370. № 012020. (0,69 п.л./0,34 п.л.).