

РАЗРАБОТКА ГИДРОПНЕВМОАГРЕГАТОВ МАШИН ПО  
ПРОИЗВОДСТВУ МИКРОПОРОШКОВ ИЗ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

Специальность

05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
канд. техн. наук, доцент  
Е.В. Сафонов

Челябинск – 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Литературный обзор, постановка цели и задачи исследований.....	10
1.1 Обзор основных методов получения металлических порошков.....	13
1.2 Получение металлических порошков из расплавов.....	20
1.3 Основные схемы подачи жидкого металла в распылительную форсунку.....	23
1.4 Дробление жидких струй.....	25
1.5 Диспергирование высокотемпературных жидкостей.....	33
2. Расчет технологических режимов получения порошков распылением расплава.....	43
2.1 Физико-химические основы процесса распыления.....	43
2.2 Расчет движения жидкого металла в системе.....	45
2.3 Расчет процесса распыления.....	54
2.3.1 Необходимая скорость струи.....	54
2.3.2 Время дробления струи жидкого металла .....	56
2.3.3 Время сфероидизации капли.....	57
2.3.4 Время охлаждения капли.....	58
3. Оборудование и обработка результатов .....	69
3.1 Установка распыления металлов УРМ-001.. ..	69
3.2 Программа и методика исследования свойств микропорошков.....	74
3.3 Исследование свойств прототипа.....	81
4. Исследование влияния технологических параметров распыления жидкого металла на УРМ-001 на характеристики получаемого материала .....	84
4.1 Перегрев жидкого металла.....	84
4.2 Давление наддува рабочей полости.....	87
4.3 Величина выхода канала подачи расплава за срез форсунки.....	89
4.4 Геометрия форсунки.....	93

4.5 Природа распыляющего газа .....	94
4.6 Изменение химического состава сплава при распылении в струе воздуха.....	99
4.7 Структура материала.....	103
Заключение.....	106
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	108
Приложение А. Результаты моделирования струи воздуха (начальная температура 27 °С) .....	117
Приложение Б. Результаты моделирования струи воздуха (начальная температура 300 °С).....	123
Приложение В. Результаты моделирования струи аргона (начальная температура 27 °С) .....	129
Приложение Г. Результаты моделирования струи аргона (начальная температура 300 °С) .....	135
Приложение Д. Результаты анализа гранулометрического состава порошков, полученных на УРМ-001, при различных сочетаниях температуры жидкого металла на входе в канал подачи ( $T_{вх.}$ ), давления наддува рабочей полости плавильного агрегата ( $P_{над.}$ ) и расстоянием между срезом канала подачи металла и срезом форсунки (L).....	141
Приложение Е. Установка распыления жидких металлов УРМ-002.....	146

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Развитие науки и техники в наши дни зачастую приводит к ужесточению требований к используемым материалам. Ярким примером этого является производство деталей методом селективного лазерного спекания металлических порошков (SLS-Selective Laser Sintering). Существенным препятствием для более широкого внедрения данной технологии является высокая стоимость используемых порошков, обусловленная жесткими требованиями по гранулометрическому составу и форме частиц порошков.

Решением проблемы является создание энергоэффективной технологии получения металлических микропорошков, что невозможно без детального изучения сопутствующих процессов.

На сегодняшний день известны различные методы получения металлических порошков: механическое измельчение металлов, центробежное распыление, восстановление руды или окалины, электролитический метод, электрический взрыв, распыление расплава сжатым газом. В работе был рассмотрен метод получения металлических порошков распылением расплавов сжатым газом. Метод характеризуется высокой производительностью и возможностью получения материала, обладающего высокой химической чистотой.

Распыление расплавов при производстве металлических порошков стало применяться с 50-х годов прошлого века, наибольшее количество публикаций по данной теме в СССР также относится к этому периоду. Основываясь на работах Л. Прандтля, Д. Рэлея, Д. Вебера, В.И. Блинова значительный вклад в исследование процессов дробления жидких внесли А.С. Лышевский, Л.А. Клячко, Дж. Гордон, Л.А. Витман, В.А. Бородин. Наиболее полное и комплексное описание процессов распыления высокотемпературных жидких струй представлено в работах О.С. Ничипоренко, Ю.И. Найда.

Вместе с тем изучение процессов дробления высокотемпературных струй сопряжено с рядом трудностей и на сегодняшний день остается актуальным вопросом. Об актуальности проблемы говорит большое количество патентов,

относящихся к установкам распыления металлов и конструкциям распылительных форсунок. В то же время связь между параметрами распыления и характеристиками получаемого материала изучена недостаточно. С появлением современных вычислительных пакетов появилась возможность точного моделирования процессов распыления высокотемпературных расплавов, что позволяет, основываясь на математических расчетах, компьютерном моделировании и данных, полученных в ходе экспериментов, дать более точную оценку влияния того или иного фактора на условия распыления.

В настоящей работе изучается гидродинамика потоков высокотемпературной жидкости, движущейся под давлением движении по кварцевому каналу из камеры плавильного агрегата в распыляющую форсунку. С точки зрения рассматриваемой здесь методики, представляет интерес выявление закономерностей между условиями процесса (давление наддува камеры, температура металла, природа и скорость струи распыляющего газа) и характеристиками получаемого материала. Детальное изучение закономерностей влияния параметров процесса распыления на свойства порошков позволит с высокой точностью задавать свойства продукции.

**Объектом исследования** является гидродинамика и процесс распада струй жидких металлов в газовых потоках.

**Предметом исследования** является взаимосвязь между техническими параметрами работы гидропневмоагрегатов машины по производству порошков, процессом движения высокотемпературных жидкостей, процессом дробления высокотемпературных жидкостей в газовых потоках и параметрами получаемых порошков.

**Целью работы** является создание гидропневмоагрегатов машины по получению порошков, предназначенных для использования в технологиях селективного лазерного спекания.

**Задачи исследования:**

1. Разработка гидропневмоагрегатов установки по получению порошков с заданными характеристиками на основе метода распыления жидкого металла газовой струей.

2. Разработка методики расчета диаграмм технологических режимов работы гидропневмоагрегатов установки по получению порошков методом распыления жидких металлов газовой струей.

3. Установление экспериментальных связей между параметрами процесса получения порошков распылением жидких металлов газовой струей и характеристиками получаемого порошка.

**Методы исследования.** В работе использованы методы численного моделирования газовой струи на основе пакетов ANSYS CFX, методы математического моделирования, эксперимент, методы теории вероятности и математической статистики при обработке эксперимента.

**Достоверность и обоснованность** научных положений, выводов и результатов, приведенных в работе, подтверждается следующим:

- использованием фундаментальных законов механики жидкостей и газов на основе уравнений Навье-Стокса для моделирования процессов;
- выполнением математических расчетов на основе классических законов гидромеханики (уравнение Бернулли);
- согласованием расчетов и результатов моделирования с экспериментальными данными.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Разработана новая установка по получению порошков с заданными характеристиками на основе метода распыления жидкого металла газовой струей.

2. Разработана новая методика расчета диаграмм технологических режимов работы гидропневмоагрегатов установки по получению порошков методом распыления жидких металлов газовой струей.

3. Установлены новые экспериментальные связи между параметрами процесса получения порошков распылением жидких металлов газовой струей и характеристиками получаемого порошка.

**Практическая значимость работы.** Разработанный вычислительный алгоритм позволяет сформулировать требования, предъявляемые к оборудованию, используемому при получении порошков методом распыления жидких металлов. Предложенная методика позволяет выбирать режимы работы оборудования в зависимости от требований, предъявляемых к получаемым порошкам. Результаты работы могут быть использованы, как на действующих предприятиях по производству металлических порошков, так и при проектировании установок по распылению жидких металлов. Разработана новая установка по получению порошков с заданными характеристиками на основе метода распыления жидкого металла газовой струей.

**Личный вклад.** Результаты, приведенные в исследовании, получены лично автором. В ходе исследований разработана методика расчета диаграмм технологических режимов работы гидропневмоагрегатов установки по получению порошков методом распыления жидких металлов газовой струей; разработана математическая модель движения струи высокотемпературной жидкости по каналу подачи в распылительный узел с учетом фазового перехода; разработана схема процесса распыления; разработана установка по получению порошков с заданными характеристиками на основе метода распыления жидкого металла газовой струей.; проведены и статистически обработаны экспериментальные исследования по распылению жидких металлов, подтверждающие правильность расчетов и эффективность предложенного метода; выполнен анализ свойств получаемых порошков; выявлены связи между параметрами процесса распыления и характеристиками получаемого материала.

**Материалы,** на которых проводились исследования – жидкие расплавы меди и чугуна марки СЧ15, распыляющие газы – аргон и воздух. Оборудование – установка распыления металлов УРМ-001.

Предпосылками достижения цели стали:

а) Создание новой установки распыления металлов и сплавов УРМ-001 (патент №110312 от 20.11.2011) на базе НОЦ «Машиностроение и металлургия» ЮУрГУ.

б) Программа ЮУрГУ по разработке металлических порошков для технологии SLS-Selective Laser Sintering,

в) Работа проводимая совместно с сотрудниками Национальной инженерной школой Сент-Этьенна (ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009 - 2013 годы, «Технология и установка для изготовления высокотехнологичных порошковых материалов, пригодных для использования в производстве сложных функциональных изделий методом селективного лазерного спекания», соглашение №14.В37.21.0759).

**На защиту выносятся:**

1. Установка по получению порошков с заданными характеристиками на основе метода распыления жидкого металла газовой струей.

2. Методика расчета диаграмм технологических режимов работы гидropневмоагрегатов установки по получению порошков методом распыления жидких металлов газовой струей.

3. Экспериментальные связи между параметрами процесса получения порошков распылением жидких металлов газовой струей (давление наддува рабочей полости плавильного агрегата, температура жидкости, расстояния между срезом канала подачи металла и срезом форсунки) и характеристиками получаемого порошка.

Работа выполнена в рамках реализации программы развития Национального исследовательского университета ЮУрГУ, приоритетное направление развития №4 «Ресурсоэффективные технологии создания и эксплуатации комплексов морских баллистических ракет».

**Апробация результатов работы.** Основные результаты исследований, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на: 62-й Научной конференции "Наука ЮУрГУ" (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2010); XIV Международной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали» (ЮУрГУ, г. Сатка, 2010); Всероссийской научно-технической конференции «Динамика машин и рабочих процессов» (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2012); Международной научно-технической молодежной конференции «Новые



материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России» (ВИАМ, г. Москва, 2012).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы отражены в 8 научных статьях; в том числе в 5, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК; в том числе публикация в журнале, входящем в базы данных Web of science и Scopus в ходе работы получены 2 патента на полезную модель: «Установка для распыления жидких металлов» (№110312 от 20.11.2011), «Установка для распыления жидких металлов» (№133445 от 20.10.2013).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, 5 приложений, списка использованных источников из 90 наименования. Общий объем работы составляет 147 страниц, 136 рисунков и 12 таблиц.

## 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР, ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Увеличение числа областей применения порошковых материалов, обусловленное существенным экономическим эффектом от замены деталей, произведенными традиционными методами, на спеченные, привело к тому, что в начале 21 века ежегодный прирост продукции порошковой металлургии составлял 5% в США и 13,5% в странах Западной Европы. За последнее десятилетие потребление порошковых материалов в мире продолжало возрастать. Это связано не только с увеличением потребности в традиционных областях, таких как машиностроение, производство припоев, электротехника, производство красок, медицина, производство взрывчатых веществ и т.д., но и с распространением новых методов получения деталей.

Одним из наиболее перспективных методов является селективное лазерное спекание порошков (SLS-SelectiveLaserSintering). Метод представляет собой выращивание объекта из порошкообразных материалов на основе трехмерной модели. Данная технология практически исключает необходимость последующей обработки, что значительно экономит материалы и время на изготовление детали. Так на промышленных предприятиях на этапе ОКР при создании новых деталей и усовершенствования существующих, в условиях неопределенности результата, когда конструкция изделия еще не отработана, не утверждена, для изготовления образцов не целесообразно создавать «нормальную» технологическую оснастку под серийное производство. В этих условиях весьма дорогостоящая продукция – литейная оснастка, оказывается, по сути, разовой и в дальнейшей работе, в связи с естественными и существенными изменениями конструкции изделия в ходе ОКР над изделием, не используется. Поэтому каждая итерация, каждое приближение конструкции детали к окончательной версии требует зачастую и новой технологической оснастки, поскольку переделка старой оказывается чрезмерно трудоемкой или невозможной. В этой связи традиционные методы оказываются не только дороги в плане материальных потерь и потери времени, но и

чрезвычайно энергозатратны. Лазерное спекание же позволяет в кратчайшие сроки изготовить опытный образец любой детали, что обуславливает высокие темпы распространения данной технологии в таких отраслях, как ракето- и самолетостроение, машиностроение и медицина (изготовление имплантов).

В последние годы появилось большое количество публикаций посвященных перспективам технологии селективного лазерного спекания в нашей стране. Так в работах [6,11] рассмотрены возможности быстрого прототипирования для создания композитных материалов; в работах [18,48,75,88] – перспективы в машиностроении, авиационной и аэрокосмической отраслях; в работе [72] – в медицине; в работе [89] – при изготовлении моделей и литейных форм; в работе [21] оценено снижение себестоимости изделий авиационно-космической техники при изготовлении методами послойного синтеза.

Однако во многих работах отмечается высокая стоимость расходных материалов (порошков), применяемых в технологиях селективного лазерного спекания. Эта проблема является следствием повышенных требований к фракционному составу используемых материалов. Зачастую пригодными для использования в технологиях Selective Laser Sintering могут быть порошки с шириной диапазона размеров частиц в несколько десятков микрон.

Кроме того, следует отметить, что основными производителями металлических порошков в нашей стране являются крупные предприятия с устоявшейся линейкой продукции, ориентированные на крупные заказы. Поэтому в условиях, когда при изготовлении ответственных деталей и опытных образцов требуются малые партии микропорошков специальных сплавов, производители деталей методом SLS сталкиваются с проблемой узкого диапазона сплавов микропорошков.

Все вышесказанное приводит к тому, что основная часть российских производителей изделий методами SLS вынуждена приобретать микропорошки за границей. Выходом из ситуации видится создание широкопрофильного мелкосерийного технологического комплекса для получения микропорошков.

Об актуальности вопроса создания установок различного типа по получению металлических микропорошков говорит большое количество патентов. Так, в патентах [59,63,64,70] представлены установки по получению порошков центробежным распылением; в патентах [60,61,66] – установки, окончательное охлаждение материала в которых происходит в воде; в патентах [58,62,67,68] – установки, дробление металла в которых происходит в газовой струе.

Однако особенности технологических процессов селективного лазерного спекания обуславливает специфические требования к применяемым микропорошкам. Во-первых, данный метод, как правило, используется при производстве ответственных изделий, что предполагает использование материалов с минимальным количеством примесей в химическом составе. Во-вторых, для обеспечения высокого качества спеченной детали требуются микропорошки определенного гранулометрического состава с узким диапазоном размеров частиц. В-третьих, технология селективного лазерного спекания предполагает послойное спекание микропорошка, что объясняет повышенные требования к текучести и насыпной плотности материала, а, следовательно, к форме частиц материала. Таким образом, способ получения металлических микропорошков, используемых в SLS-технологиях, должен отвечать следующим требованиям:

- химическая чистота получаемого материала;
- ярко выраженный пик на кривой распределения размеров частиц;
- форма частиц порошка, близкая к сферической.

Кроме того, метод должен быть универсальным с точки зрения возможности получения порошков различных материалов, мобильным (возможность быстрого переориентирования производства), должен позволять переключаться на получение порошков различных материалов, иметь высокую производительность, возможность автоматизации, а также давать возможность контроля гранулометрического состава получаемого материала.

Исходя из указанных выше требований, был произведен анализ существующих методов получения металлических порошков.

## 1.1 Обзор основных методов получения металлических порошков

Для обеспечения различных требований, предъявляемых к материалам (гранулометрический состав, форма частиц и т.д.), а также в зависимости от дальнейшего использования, производители выбирают [73] различные методы получения металлических порошков. Ниже приведены основные методы, а также обобщены главные достоинства и недостатки с точки зрения производства материала для технологий селективного лазерного спекания.

1) Электрический взрыв (рисунок 1.1): суть метода заключается в пропускании электрического заряда через проволоку малого диаметра, что позволяет получать порошки различных металлов и их оксидов с размером частиц менее 100 нм.

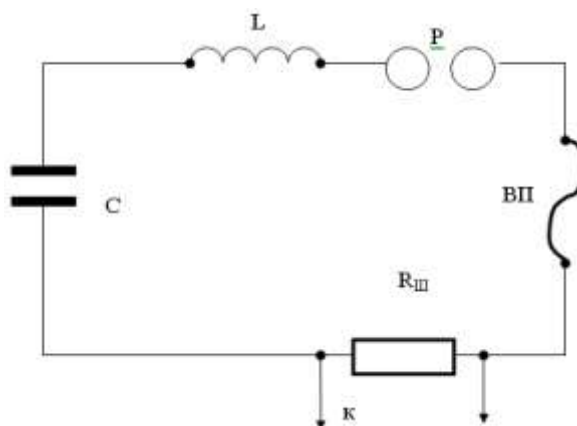


Рисунок 1.1. Схема электрического взрыва

Для порошков, полученных методом электрического взрыва [73], характерна сферическая форма частиц (рисунок 1.2).

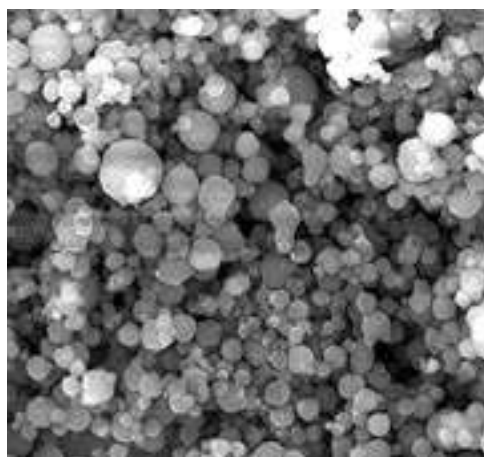


Рисунок 1.2. Фото порошка, полученного методом ЭВП

Метод требует постоянного присутствия напряжения на высоковольтном электроде, что приводит к интенсивному осаждению порошка на поверхности изолятора этого электрода и, следовательно, к частым пробоям изолятора при получении металлических порошков.

2) Механическое измельчение (резание, измельчение в шаровых вращающихся мельницах). В порошковой металлургии широко распространено механическое измельчение компактных материалов. Практически этим способом можно превратить в порошок любой металл или сплав.

- Обработка металлов резанием. На рисунке 1.3 изображен способ получения металлических порошков фрезерованием цилиндрической заготовки, вращающейся вокруг оси, параллельной оси вращения фрезы, отношение скоростей вращения заготовки и фрезы находится в диапазоне 1/100 - 1/1000.

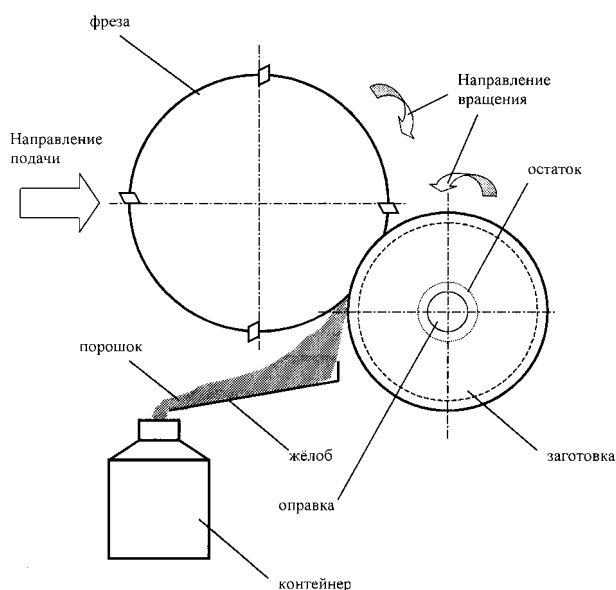


Рисунок 1.3. Схема получения металлических порошков фрезерованием

- Измельчение в мельницах (шаровых, вихревых, планетарных центробежных и т.д.). Наиболее распространенный вариант – шаровая мельница (рисунки 1.4,1.5). В упрощенном виде агрегат представляет собой стальной цилиндрический барабан, внутри которого находятся размольные тела (стальные или твердосплавные шары), при вращении, измельчающие материал, загруженный в цилиндр.

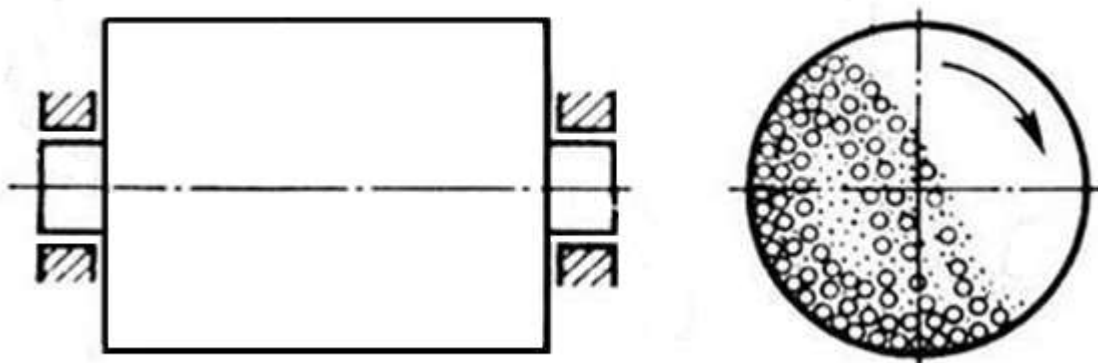


Рисунок 1.4. Шаровая мельница

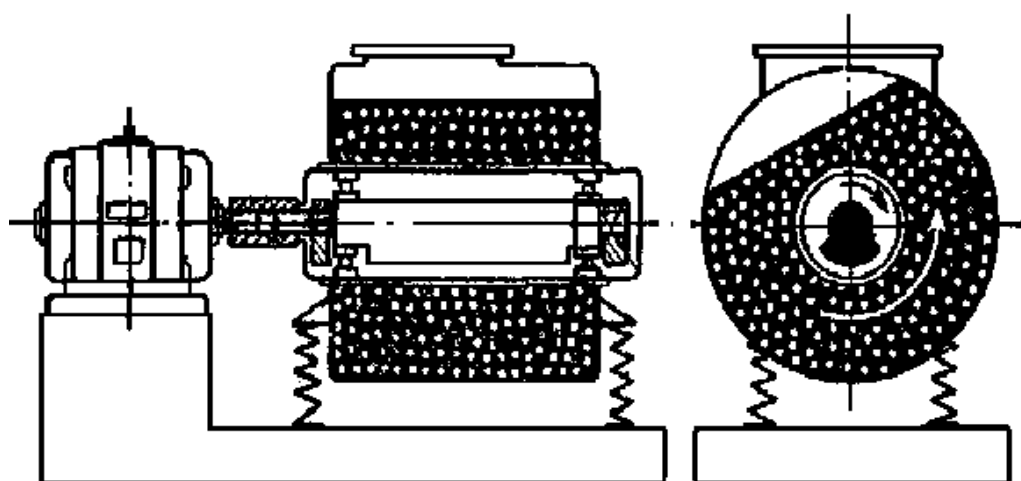


Рисунок 1.5. Шаровая вибрационная мельница

- Измельчение ультразвуком. Процесс дробления материала, погруженного в жидкость (вода, спирт, ацетон и др.) посредством распространяющихся звуковых волн.

Однако данные методы сопряжены с высокими энергетическими затратами, а получаемые порошки [73], как правило, имеют (рисунок 1.6) осколочную форму частиц.

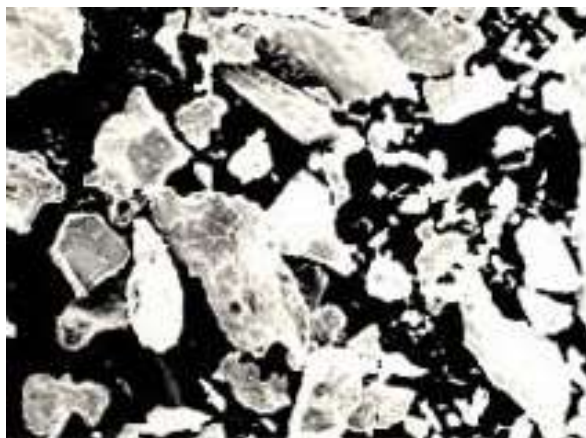


Рисунок 1.6. Фото порошка железа, полученного механическим измельчением

3) Физико-химические методы [73] – процессы, в ходе которых порошок является результатом физико-химических превращений исходного материала.

- Получение металлических порошков восстановлением химических соединений. Чаще всего представляет собой восстановление оксидов металлов водородом или оксидом углерода, в качестве исходного сырья выступают обогащенные руды.

- Получение металлических порошков электролизом (рисунок 1.7). Особенностью является своеобразность процесса восстановления – перераспределение электронов и передача их металлу с одновременной перестройкой структуры происходит не с помощью восстановителей, а за счет энергии электрического поля.

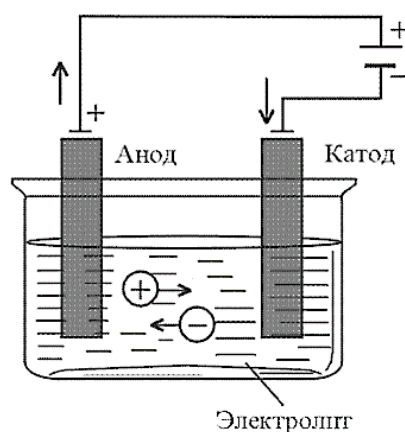


Рисунок 1.7. Схема восстановления металлов из соединений электролизом

Для порошков [73], полученных электролизом из водных растворов или расплавов солей, характерна дендритная форма частиц (рисунок 1.8).



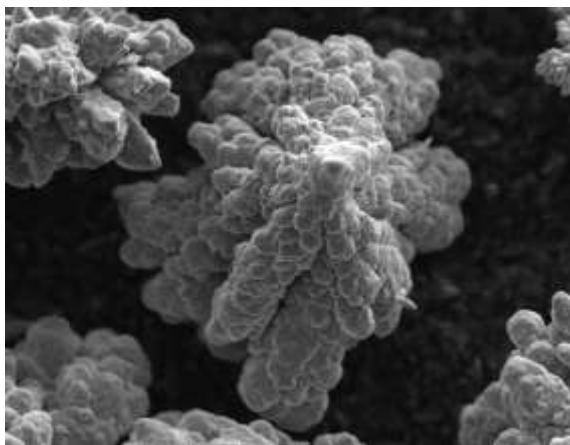


Рисунок 1.8. Фото медного электролитического порошка

- Получение металлических порошков термодиффузионным насыщением. Суть метода заключается в совместном нагреве смеси различных материалов.

4) Получение металлических порошков с использованием межкристаллитной коррозии.

Данные методы часто позволяют получать порошки с комплексом свойств, который невозможно обеспечить другими методами. Позволяют получать металлические порошки с высокими показателями химической чистоты, однако данные методы не получили широкого распространения из-за недостаточной производительности.

5) Получение металлических порошков методом испарения-конденсации (рисунок 1.9). Как правило, используется при получении металлических порошков материалов с высокой упругостью паров.

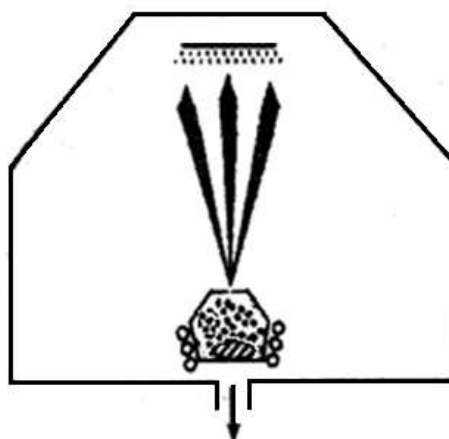


Рисунок 1.9. Схема получения металлических порошков методом испарения-конденсации

б) Получение металлических порошков из расплавов (распыление жидкой струей, газом, магнитогидродинамическое дробление, центробежное распыление и др).

В таблице 1.1 приведены основные методы получения металлических порошков.

Таблица 1.1. Основные методы получения металлических порошков

Метод	Достоинства	Недостатки
Электрический взрыв	Простота регулирования свойств конечных продуктов электровзрыва-дисперсного, фазового и химического состава порошков с помощью электрических параметров.	Характеризуется низкой производительностью, а необходимость использования проволоки увеличивает стоимость порошка
Обработка металлов резание	Позволяет получать порошки металлов, имеющих высокое сродство к кислороду (магний)	Характерной особенностью является высокий износ конструкционных элементов оборудования
Измельчение в шаровых вращающихся мельницах	Дисперсность получаемого материала достаточно легко регулируется скоростью вращения барабана	Неправильная форма частиц
Измельчение ультразвуком	Полученный материал обладает высокой химической частотой	Частицы имеют большое количество микроискажений
Получение металлических порошков восстановлением химических соединений	Восстановлением различных соединений могут быть получены практически все металлы	Для скоростей процесс большое значение имеет значение удельной поверхности материалов, что часто требует дополнительного дробления
Получение металлических	Не требует использования	Процесс достаточно

порошков электролизом	ограниченных по запасам энергоносителей, позволяет получать материалы с высокой чистотой	энергоемкий и обладает невысокой производительностью
Получение металлических порошков термодиффузионным насыщением	Позволяет получать порошки сталей и сплавов, легированных элементами, оксиды которых трудновосстановимы	Длительный энергозатратный процесс, характерный трудностями регулировки химического состава получаемого материала
Получение металлических порошков методом испарения-конденсации	Посредством изменения режимов осаждения можно получать различную форму частиц	Низкие скорости испарения металлов негативно сказываются на производительности процесса
Получение металлических порошков с использованием межкристаллитной коррозии.	Позволяет получать порошки сложнолегированных сплавов	Требует предварительной термообработки материалов, имеет ограничения по химическому составу получаемых материалов, продукция имеет высокую стоимость
Получение металлических порошков из расплавов	Высокая производительность и энергоэффективность, возможность получения микропорошков со сферической формой частиц	Сложности в получении порошков высокоактивных и тугоплавких материалов, большие затраты на газ-распылитель (в случае распыления металла в струе инертного газа)

Таким образом, анализ основных методов производства металлических микропорошков позволяет сделать выбор в пользу получения порошков из расплавов.

## 1.2 Получение металлических порошков из расплавов

Перегревом металлическую жидкость можно перевести в идеальное раулевское состояние, с идеальным атомным перемешиванием. Подавление же спонтанного процесса кристаллизации частиц небольшого объема за счет большой скорости кристаллизации позволяет почти зафиксировать указанное структурное состояние. Данный эффект особенно важен в случае диспергирования многокомпонентных, склонных к ликвации при застывании сплавов, как известно, именно ликвация является причиной многих дефектов металла.

Следовательно, главным преимуществом методов получения металлических порошков из расплавов перед другими методами, является возможность получения дисперсных частиц порошка с микрооднородной структурой.

Способы получения металлических порошков распылением расплавов, обычно классифицируют по трем признакам:

- способ перевода металла в жидкое состояние (индукционный нагрев, электродуговой, электроннолучевой, плазменный, лазерный и т.д.);
- способ воздействия на расплав при диспергировании (механическое воздействие, энергия газовых и водяных потоков и т.д.);
- газовая среда, в которой происходит процесс плавления и распыления (восстановительная, окислительная, инертная, вакуум).

Распыление жидкой струей (как правило, водяной) или в воду применяют, когда расплав не содержит активных элементов, которые могут взаимодействовать с водой. Данный способ требует включения в технологическую цепочку стадии сушки получаемого порошка. Отличительные черты метода обусловлены физическими свойствами энергоносителя, так сравнительно высокая плотность воды позволяет получать при одинаковых скоростях с газовой струей существенно большее значение импульса движения и кинетической энергии энергоносителя. Контакт высокотемпературного расплава с водой вызывает интенсивное парообразование вокруг струи металла и каждой

капли. Так называемая паровая рубашка уменьшает скорость охлаждения металла, в случае же разрушения паровой оболочки при контакте с водой теплоотвод резко увеличивается. Высокая плотность воды позволяет сохранять скорость струи на расстоянии до 20 см от среза сопла, что дает возможность конструировать различные по конфигурации форсунки. Повышенное значение энергоносителя в сравнении с окружающей средой обуславливает незначительный подсос газа к зоне распыления, в результате чего воздействие эжектируемого потока воздуха на струю расплава практически отсутствует, а набрызгивание капель металла на форсунку снижается. Стоит отметить, что габаритные размеры агрегатов при технологии распыления в воду по габаритным размерам значительно меньше размеров установок газового распыления [55].

Центробежное распыление также представляет собой один из основных видов диспергирования расплава. Важной отличительной особенностью и достоинством этого процесса является возможность реализации диспергирования в высоком вакууме. Существуют 2 принципиальные схемы процесса: с подачей струи расплава на вращающийся диск и с вращающимся оплавливаемым электродом (рисунок 1.10).

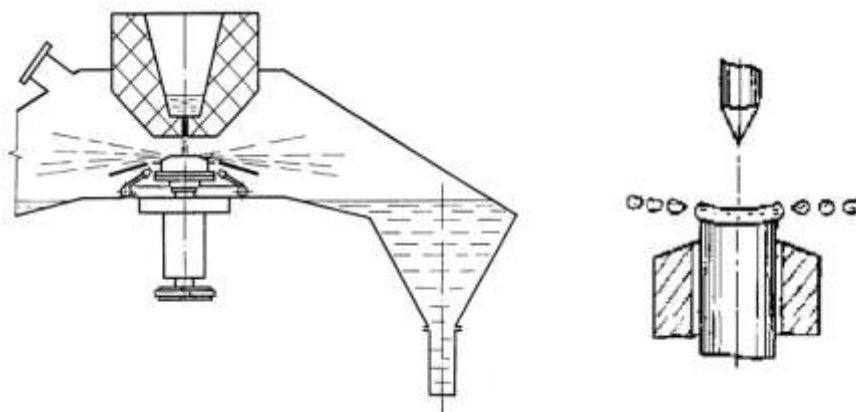


Рисунок 1.10. Схемы центробежного распыления расплава:

а – с подачей струи расплава на вращающийся диск; б – с вращающимся электродом

В первой схеме (рисунок 1.10а) распыление происходит в момент попадания струи расплава на дисковое устройство, вращающееся со скоростью до 24000 об/мин, скорость охлаждения металла составляет  $10^5 - 10^6$  °С/с. Формирование расплава происходит под действием различного рода источников нагрева, в роли

которых могут, в зависимости от возможностей производителей, выступать индукционная печь, электрическая дуга и др. Как правило, по такой схеме получают порошки металлов и сплавов с температурой плавления менее 1600 °С [33].

Установки бестигельного распыления (рисунок 1.10б) обеспечивают получение высокочистых порошков и практически не имеют ограничений по температуре плавления материала получаемого порошка. К недостаткам схемы стоит отнести необходимость тщательной обработки поверхности и балансировки оплачиваемых заготовок для обеспечения работоспособности узла вращения заготовки, наследование неоднородности химического состава заготовки получаемым материалом и невозможность использования 100% материала заготовки [33]. Данная технология позволяет менять гранулометрический состав порошка изменением частоты вращения расходуемой заготовки. Источниками нагрева заготовок чаще выступают электронные пушки или плазмотроны.

Распыление металла в струе газа. Данный метод характеризуется высокой производительностью. Распыление металла газом наиболее универсальное решение, позволяющее в зависимости от требований к химическому составу и форме частиц порошка использовать различные виды газа, изменением скорости распыляющего газа изменять гранулометрический состав получаемого материала, а изменением скорости охлаждения влиять на микроструктуру металла. Кроме того, данный метод отличается невысокими значениями энергозатрат, сравнительно мало влияет на окружающую среду.

Однако физические свойства, такие например, как одни из важнейших параметров – поверхностное натяжение и вязкость, особенно высокотемпературных сплавов, не всегда можно изменить перегревом в желаемом направлении до нужных значений. Поэтому очень важную роль играет химический состав распыляемого сплава.

В связи с причинами, указанными выше, одним из самых распространенных методов получения металлических порошков является диспергирование жидкого расплава газовой струей.

### 1.3 Основные схемы подачи жидкого металла в распылительную форсунку

1) Схема с донным сливом расплава в распылительную форсунку (рисунок 1.11)

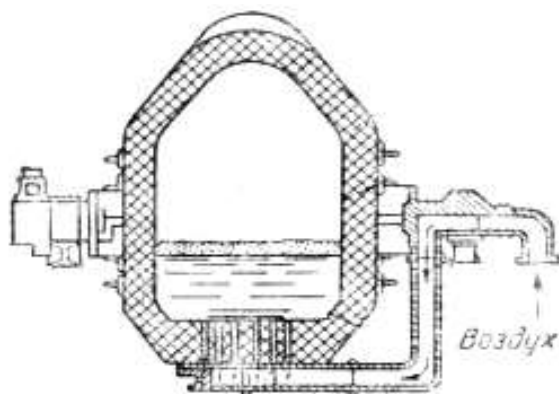


Рисунок 1.11. Схема донного слива расплава

Металл нагревается в плавильном агрегате, после чего срабатывает запорный механизм (шиберный затвор или др.), и расплав сливается через донное отверстие. Скорость подачи металла зависит от уровня расплава в агрегате, в процессе распыления падает, регулируется слабо, если ускорить движение расплава возможно увеличением давления в камере, то замедлить до необходимой скорости практически невозможно. Кроме того, данная схема требует использования футеровки сложной геометрии, а сливной канал в связи с контактом с высокотемпературной струей подвержен износу.

2) Схема со сливом в промежуточный ковш (рисунок 1.12)

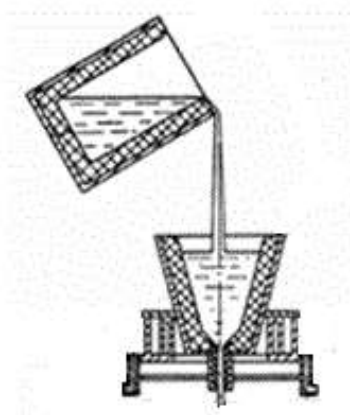


Рисунок 1.12. Схема со сливом в промежуточный ковш

Распыление по данной схеме сопряжено с охлаждением расплава при сливе в промежуточный ковш, а, следовательно, требует перегрева металла. Подготовка промежуточного ковша также требует предварительного нагрева футеровки. Это существенно повышает энергетические затраты. Кроме того, при распылении по данной схеме требуется вдвое большее количество футеровки, а слив металла сопряжен с термическими ударами, что негативно сказывается на ее эксплуатационных свойствах. Плюсом данного способа является возможность организации непрерывного процесса, а поддержание уровня расплава в промежуточном ковше на определенном уровне позволяет стабилизировать скорость подачи металла в форсунку.

### 3) Схема с вытеснением металла из рабочей камеры (рисунок 1.13)

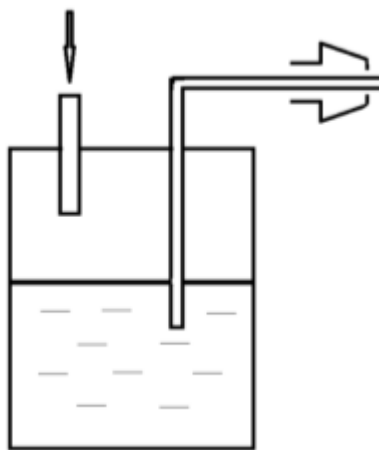


Рисунок 1.13. Схема с вытеснением металла из рабочей камеры

Данная схема обладает рядом преимуществ: нет необходимости в использовании шиберного затвора или другого запорного механизма для донного отверстия, нет повышенного износа футеровки в районе донного отверстия; в сравнении со схемой со сливом металла в промежуточный ковш снижаются энергетические потери, т.к. не требуется значительного перегрева расплава; не требуется дополнительного количества огнеупорных материалов для промежуточного ковша, футеровка не испытывает значительных термических ударов; а также нет необходимости в наклонном механизме. Однако возникает необходимость в использовании тонкостенных керамических трубок, выполняющих функцию каналов подачи расплава.



Для реализации газового распыления используют установки двух типов: с подачей расплава непосредственно в форсуночное устройство из плавильной печи (в случае металлов и сплавов с температурой плавления менее  $700^{\circ}\text{C}$ ) или через обогреваемый металлоприемник (в случае материалов с температурой плавления до  $1600^{\circ}\text{C}$ ). В работе предложена и реализована схема распыления металлов с температурой плавления около  $1200^{\circ}\text{C}$  без обогреваемого металлоприемника.

Таким образом, с учетом возможности регулирования скорости подачи расплава в распыляющую форсунку, отсутствием необходимых энергозатрат, связанных с перегревом металла при использовании промежуточного ковша, а также возможности использования обычной футеровки без донного отверстия было принято решение об использовании в работе схемы с вытеснением металла из рабочей камеры.

Научные основы технологии производства распыленных металлических порошков состоят из нескольких разделов – это процессы подготовки расплавов, распыление, регулирование технологических характеристик порошков, а также химико-термическая обработка распыленных порошков.

Наиболее важной является проблема диспергирования: именно этот процесс определяет высокую производительность метода и основные технологические характеристики порошка.

#### 1.4 Дробление жидких струй

Впервые задача о распаде цилиндрической струи жидкости без воздействия на нее внешней среды была решена Релеем [79], который использовал метод малых возмущений. Основная предпосылка решения заключалась в предположении о том, что волна с растущей амплитудой представляет собой будущую каплю, а порядок величины капли определяется длиной волны неустойчивого колебания. Релей показал, что распад струи жидкости в начальной фазе происходит вследствие неустойчивости ее движения в результате воздействия малых возмущений, источником которых могут служить неровности и шероховатости поверхности сопла, неправильная геометрия отверстия,

пульсации в жидкости и т.п. Согласно работам Лышевского [43,46] и Треша [83,84] при малой скорости истечения струя жидкости начинает деформироваться на некотором удалении от насадки, а степень деформации определяется только осесимметричными колебаниями струи. По мере удаления от насадки амплитуда деформации возрастает, в итоге на некотором расстоянии струя распадается на отдельные капли преимущественно одинаковых размеров. С увеличением скорости движения струи осесимметричные колебания сменяются волнообразными деформациями, искривляющими ось струи и разрушающими ее в радиальном направлении. Дальнейшее увеличение скорости приводит к тому, что участок струи, на котором происходит ее разрушение, смещается к торцу сливного отверстия, а волнообразный распад струи переходит в распыление, следствием чего является появление факела распыла на срезе сливного отверстия. При этом дисперсность капель зависит от плотности среды в камере распыления и скорости движения жидкости.

Позднее [79] Релеем было рассмотрено влияние вязкости на распад струи, однако практического применения результаты этой работы по причине сложности полученного выражения не нашли. Вебер [22] на основе теории Релея вычислил время распада струи. Выводы из работы Томатика [12] позволили дать качественную характеристику влияния параметров струи жидкости на процесс ее распада (таблица 1.2).

Таблица 1.2. Влияние параметров струи на процесс распада

Характеристика распада струи	Радиус	Скорость истечения	Плотность	Вязкость	Поверхностная энергия
	При увеличении параметров струи				
Тенденция к распаду	↑	↑	↑	↓	↓
Длина нераспавшейся части	↑	↓	↓	↑	↓
Размер образующихся капель	↑	Re>12 ↓ Re<12 ↑	ρ>3 ↓ ρ<3 ↑	↑	↑

Однако более точные выводы, включающие количественные зависимости между свойствами окружающей среды (скорость, температура, плотность), в работе Томатика отсутствуют.

Параметры распада (таблица 1.3) струи при дроблении меди были рассчитаны в работах [40,79]. Различие полученных результатов подтверждает значительное влияние вязкости, не учитываемой в методике, использовавшейся в работе [79]. Повышение вязкости жидкости увеличивает время распада струи и капель и приводит к увеличению длины нераспавшейся части струи.

Таблица 1.3. Результаты расчета параметров распада струи меди по различным методикам

Характеристика	[79]	[40]
Частота колебаний струи, с <sup>-1</sup>	5,3	1,85
Время распада струи,с	0,19	0,54
Размер образующихся капель, мм	3,6	1,1
Длина неразрушенной части струи, мм	9,4	27

Л.А. Витман, исходя из предположения о том, что струя распадается под воздействием осесимметричных возбуждений, получил критериальные комплексы, характеризующие процесс распада струи, основными из которых являются:  $\pi_1$  (характеризует отношение вязкостных и инерционных сил к силам поверхностного натяжения),  $\pi_2$  (характеризует отношение инерционных сил газовой среды к силам поверхностного натяжения),  $\pi_3$  (определяет дисперсность капель),  $\pi_4$ ,  $\pi_5$  (симплексы, характеризующие вязкостные и плотностные соотношения жидкости и газовой струи).

$$\pi_1 = \frac{\mu_{ж}}{\rho_{ж} \cdot \sigma_{ж} \cdot D_{ст}}, \quad (1.1)$$

где  $\mu_{ж}$  – вязкость жидкости;

$\rho_{ж}$  – плотность жидкости;

$\sigma_{ж}$  – поверхностное натяжение жидкости;

$D_{ст}$  – диаметр струи.

$$\pi_2 = \frac{\rho_{\Gamma} \cdot D_{\text{ст}} \cdot W_{\Gamma}^2}{\sigma_{\text{ж}}}, \quad (1.2)$$

где  $\rho_{\Gamma}$  – плотность газа;

$W_{\Gamma}$  – относительная скорость движения струи.

$$\pi_3 = \frac{d}{D_{\text{ст}}}, \quad (1.3)$$

где  $d$  – диаметр капель.

$$\pi_4 = \frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\Gamma}}, \quad (1.4)$$

где  $\mu_{\Gamma}$  – вязкость газа.

$$\pi_5 = \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\Gamma}}; \quad (1.5)$$

Л. Треш развивал теорию распада струй для вязких жидкостей [52,84], что позволило определить зависимости между параметрами процесса, характеристиками струи (радиус, кинематическая вязкость) и характеристиками распада для идеальной и реальной струй жидкости (таблица 1.4).

Таблица 1.4. Характеристики распада идеальной и реальной жидкости

Характеристика	Формула для определения параметров	
	Идеальная жидкость	Реальная жидкость
Максимальная частота колебаний струи	$f_{\text{max}} = 12 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_{\Gamma} \cdot r^3}}$	$f_{\text{max}} = \frac{\sqrt{\frac{\sigma}{2 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot r^3}}}{2 + 3 \cdot \nu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{\Gamma}}{\sigma_{\text{ж}} \cdot r}}}$
Время распада струи	$\tau = 8,46 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma} \cdot r^3}{\sigma_{\text{ж}}}}$	$\tau = 5 \cdot \frac{r \cdot \nu \cdot \rho_{\Gamma}}{\sigma_{\text{ж}}}$
Размер образующихся капель	$d = 9,02 \cdot r$	$\tau = 13 \cdot 4 \sqrt{\frac{\nu^2 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot r}{\sigma_{\text{ж}}}}$
Длина нераспавшейся части струи	$l_{\text{max}} = 8,46 \cdot W_{\Gamma} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma} \cdot r^3}{\sigma_{\text{ж}}}}$	$\tau = 5 \cdot \frac{W_{\Gamma} \cdot r \cdot \nu \cdot \rho_{\Gamma}}{\sigma_{\text{ж}}}$

В целом, выводы работ по самопроизвольному распаду струй говорят о том, что распад происходит в результате колебания, причиной которых является стремление струи под действием поверхностных сил вернуться равновесной цилиндрической форме, нарушенной при выходе струи из отверстия.

Исследованием процессов дробления жидкости под воздействием внешних сил в разные годы занимались В.И. Блинов [16,17], Л.А. Витман [23,24], Л. А. Клячко [35-37], А.С. Лышевский [42-46]. В.И. Блинов на примере воды, керосина и спирта описал механизм разрушения струи при ее течении под давлением.

Л.А. Витман установил, что обдув струи существенно интенсифицирует процесс распада струи, а также на примере воды определил связь между величиной удельного количества дутья, диаметром струи и средним размером получаемых капель.

Л.А. Клячко на основе анализа состояния динамического равновесия капли, находящейся под воздействием потока газа, и теоретического расчета, проведенного с учетом воздействия внешних и внутренних сил, влияющих протекание процесса, было получено следующее уравнение, описывающее состояние капли, при котором поверхностное натяжение полностью уравновешивает воздействие внешней силы:

$$P_r^A + P_L^A = P_r^B + P_L^B, \quad (1.6)$$

где  $P$  – наружное ( $r$ ) и лапласовское ( $L$ ) давление в лобовой ( $A$ ) и боковой ( $B$ ) точках капли.

Из данного уравнения был определен критерий равновесного состояния капли:

$$W_0 = \frac{4(k^3 + k - 2)(k^2 \arcsin \frac{\sqrt{k^2 - 1}}{k} - \sqrt{k^2 - 1})}{k^3 \sqrt{k(k^2 - 1)}}, \quad (1.7)$$

где  $W_0$  – скорость газового потока;

$k$  – соотношение взаимно перпендикулярных диаметров капли.

Согласно Л.А. Клячко разрушение капли происходит при деформации капли, соответствующей значению  $k > 6$ .

А.С. Лышевский на примере воды выделил 4 последовательные стадии дробления при увеличении относительной скорости движения струи, а также определил границы перехода между этими стадиями. Переход из одной стадии в другую обусловлен изменением параметров процесса, количественно представленных в следующем выражении:

$$We = \frac{W_{\Gamma}^2 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot d_{\kappa}}{\sigma_{\text{ж}}} = f\left(\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\Gamma}}\right), \quad (1.8)$$

где  $We$  – критерий Вебера;

$d$  – диаметр капли, м.

На основе проведенных исследований А.С. Лышевский получил основные соотношения (таблица 1.5), характеризующие параметры распада струи.

Таблица 1.5. Характеристика распада струи жидкости, обдуваемой потоком газа

Параметр распада	Формула для определения параметра
Максимальная частота колебаний струи	$f_{\max} = \frac{0,4 \cdot W_{\Gamma}^3}{\sigma_{\text{ж}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}}}}$
Время распада струи	$\tau = \frac{2,6 \cdot \sigma_{\text{ж}}}{W_{\Gamma}^3 \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\Gamma}}}}$
Размер образующихся капель	$d = \frac{\sigma_{\text{ж}}}{\rho_{\Gamma} \cdot W_{\Gamma}^2}$

О.С. Ничипоренко [55] на основе экспериментальных исследований выделяет 4 режима дробления струи (рисунок 1.14).

Первый режим распада струи (рисунок 1.14а) реализуется при скорости обдува 5 м/с; в диапазоне 5-25 м/с происходит увеличение интенсивности осесимметричных колебаний и укорочение нераспавшейся части струи (рисунок 1.14б); при скорости 25-100 м/с происходит искривление струи (рисунок 1.14в); при повышении скорости струи до 100-120 м/с дробление металла происходит в режиме факела (рисунок 1.14г). Различные режимы характеризуются изменением конечных размеров частиц.

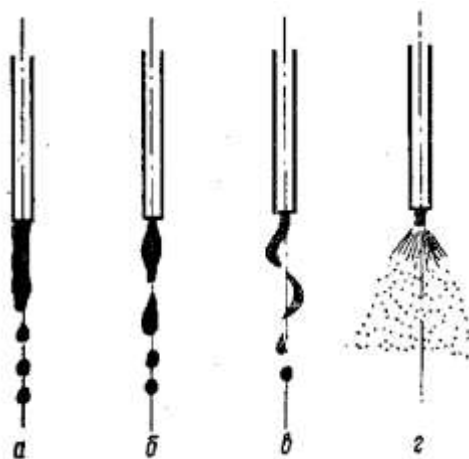


Рисунок 1.14. Примеры схем разрушения цилиндрической струи жидкости:

а - за счет осесимметричного колебания при относительной неподвижности струи; б - при малых относительных скоростях струи за счет усиления осесимметричных колебаний; в - при увеличении относительных скоростей движения струи за счет возникновения волнообразных колебаний; г - при больших скоростях движения струи за счет распыла

Описанная картина распада металлической струи хорошо согласуется с литературными данными [9,30,77,78,80,81]. Распыление струи зависит от скорости перемещения газового потока относительно струи. Количественно эту закономерность можно выразить в виде частных функциональных зависимостей между критериями Лапласа и Рейнольдса ( $L_p$ ,  $Re$ ):

$$L_p = \frac{\mu_{ж}}{\rho_{г} \cdot \sigma_{ж} \cdot D}, \quad (1.9)$$

$$Re = \frac{W_{г} \cdot D \cdot \rho_{г}}{\mu_{г}}; \quad (1.10)$$

Критериальное уравнение, описывающее процесс распыления струи имеет вид:

$$L_p = f(Re); \quad (1.11)$$

Стоит отметить, что условные границы между различными режимами дробления зависят от скорости движения газовой струи и характеризуются размерами получаемых капель. Исследования режимов дробления проводились для разных материалов, так в таблице 1.6 приведены результаты по распылению воды [5] и меди в струе воздуха.

Таблица 1.6. Влияние скорости обдува струи на характер ее дробления и размер капель

Область дробления	Скорость газовой струи	Размер капель d, мм		Причина разрушения струи
		Расплав Cu	Вода	
I	5-23	3	–	Осесимметричные колебания
II	25-100	1-3	1,0	Волнообразные колебания
III	100-250	0,5-1	0,4	Грубое распыление
IV	250	0,5	0,06	Тонкое распыление

На основе результатов работы [5] были получены численные значения (таблица 1.7) критериев  $L_p$  и  $Re$ , соответствующие различным режимам дробления струи [86].

Таблица 1.7. Значение критериев  $L_p$  и  $Re$ , соответствующих областям I – IV

Критерий	Область диспергирования (условно)			
	I	II	III	IV
$Re$	0-33	33-165	165-660	660-2160
$L_p$	$9 \cdot 10^{-9}$ - $10^{-8}$	$10^{-8}$ - $3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$ - $3 \cdot 10^{-6}$	$10^{-6}$ - $10^{-4}$

На основе экспериментальных данных была выведено эмпирическое выражение:

$$\lg L_p = 2,22 \cdot \lg Re - 11,3; \quad (1.12)$$

Данное выражение дает возможность прогноза гранулометрического состава получаемого порошка, получаемого распылением металлического расплава.

Таким образом, на основе упомянутых выше работ можно сделать вывод о том, что распад жидкой струи – сложный физический процесс, зависящий как от внутренних, так и от внешних причин. Внутренними причинами являются возмущения, вызванные несовершенством поверхности сопел и нестабильностью скорости движения струи. Однако определяющими причинами являются внешние, а именно – воздействие аэродинамических сил на движущуюся струю жидкости.



Наиболее эффективный режим дробления струи реализуется при взаимном интенсивном контакте струи и энергоносителя, то есть в двух случаях: при вытекании струи, обладающей высокой скоростью, в неподвижную среду или при интенсивном обдуве струи, движущейся с малой скоростью. Помимо относительной скорости движения струи на эффективность дробления влияет плотность газа-энергоносителя.

Очевидно, что более благоприятным для распада будет тот режим, при котором обеспечивается высокая поверхностная энергия струи, например, пленка или струя малого диаметра, однако обеспечение такого режима может негативно сказаться на производительности процесса. Таким образом, при разработке оборудования по распылению жидкостей стоит искать компромисс между эффективностью и производительностью процесса дробления.

### 1.5 Диспергирование высокотемпературных жидкостей

Диспергирование высокотемпературного металлического расплава в газовой струе, обладающей температурой, на несколько сот градусов меньшей температуры плавления металла, обуславливает скорость охлаждения металла в десятки и сотни тысяч градусов в секунду, а также скачкообразное изменение таких свойств расплава, как поверхностное натяжение и вязкость и конечным, итогом которого является изменение агрегатного состояния металла. Кроме того, зачастую, при химическом взаимодействии некоторых элементов расплава с распыляющим газом, жидкость перестает быть гомогенной, а также изменяется температура плавления материала. Другими словами, расплав в процессе распыления является ярко выраженной метастабильной жидкостью, что усложняет изучение процессов распыления.

Основной сложностью работы с метастабильной жидкостью в данном случае является необходимость поддержания высоких температур на протяжении всего процесса распыления, сохранения значений физико-химических параметров жидкости в допустимых пределах, а также необходимость резкого изменения свойств материала в момент дробления. Определение основных закономерностей

процессов диспергирования различных метастабильных жидкостей позволит разработать надежные методы управления этими процессами и определить оптимальные технологические режимы дробления высокотемпературных струй.

Стоит отметить, что большинство экспериментальных исследований процесса диспергирования расплавов ставили своей целью выяснение влияния параметров процесса на эффективность дробления металлической струи без соответствующих теоретических обобщений. Так, к примеру, в работе [71] приводится эмпирическая формула, связывающая эффективность дробления с параметрами процесса:

$$d_k = \frac{585}{W_r} \cdot \left( \frac{\sigma_{ж}}{\rho_{ж}} \right)^{0,5} + 597 \cdot \left( \frac{\mu_{ж}}{\sqrt{\sigma_{ж} \cdot \rho_{ж}}} \right)^{0,45} \left( \frac{10^3 \cdot G_{ж}}{G_r} \right), \quad (1.13)$$

где  $d_k$  – диаметр конечной капли;

$G_r$  – расход дутья;

$G_{ж}$  – расход жидкости.

Целью других работ было выяснение влияния одного из технологических параметров на конкретные характеристики получаемого порошка, как правило, размер или форма частиц. Так в работах [28,81] отмечается, что основными факторами, определяющими дисперсность порошка, являются вязкость, поверхностное натяжение и температура расплава, а также мощность и температура газового потока. Отмечается, что уменьшение вязкости и поверхностного натяжения создает благоприятные условия для дробления жидкости, увеличивает вероятность распада струи на капли. Стоит отметить, что механизм изменения вязкости в предкристаллизационный период, которому соответствуют условия распыления, исследован недостаточно. Экспериментальные данные по изучению вязкости металлов вблизи температур кристаллизации весьма противоречивы [4,10,13,14,85]. Так согласно выводам работы [14] вблизи температур кристаллизации вязкость повышается быстро, однако другие исследования [4] это не подтверждают. Влияние различных добавок также носит различный характер влияния на вязкость: известно [10], что добавка 2% калия к ртути резко

увеличивает ее вязкость, в то же время, небольшие добавки алюминия, железа, свинца, серебра или меди существенно снижает вязкость жидкого цинка [13].

В то же время в работе [28] выдвигается гипотеза о том, что заметное влияние вязкости на процесс дробления струи будет наблюдаться только при небольших значениях перегрева жидкости выше линии ликвидус, а Лышевский А.С. [43] пришел к выводу о том, что вязкость заметно влияет на эффективность дробления при повышении распада газовой среды более чем в 1000 раз.

Стоит отметить, что большинство авторов совпадают во мнении о том, что главным фактором, определяющим дисперсность частиц порошка, является энергия дутья.

Теоретические и экспериментальные исследования процессов распыления высокотемпературных расплавов проводились, как в СССР [28], так и за рубежом [3]. Так А. Ф. Силаев в своей работе [28] рассматривают перегретые металлические расплавы как типично ньютоновские жидкости, что предполагает возможность описания жидкости с высоконапорной газовой струей через некую критериальную зависимость:

$$\frac{d_{\text{к}}}{d_{\text{н}}} = f(We, Lp, M, N), \quad (1.14)$$

где  $d_{\text{н}}$  – размеры начальной и конечной капли;

$M$  и  $N$  – критерии, характеризующие соотношение плотностей и вязкости жидкости и распыляющего газа.

Одной из важных характеристик металлических порошков, определяющей такие параметры, как насыпная плотность, текучесть, формуемость и др., является форма частиц. Поэтому многие исследователи при изучении процессов распыления особое внимание уделяли механизму формообразования частиц порошка, причем, если одна часть исследователей отводила решающую роль в этом процессе величине поверхностного натяжения [71], то другая [56,57] указывала на важную роль вязкости и плотности жидкого металла при формировании капли. В то же время выводы, как правило, носили качественный характер.

Условия процесса распыления высокотемпературных жидкостей [8,49,50,52,54] являются основным фактором, определяющим форму частиц получаемого материала.

Поэтому экспериментальными исследованиями процессов формообразования частиц в процессе распыления, позволившими определить влияние основных физико-химических параметров распыления на форму частиц, в различные годы занимались многие исследователи [9,28-30,71,76,77,81]. Однако теоретический анализ особенностей формообразования частиц впервые был проведен в работах [51,56,57]. Работы основывались на предположении о том, что форма частиц зависит от того успеет ли капля сфероидизироваться до момента застывания, найденная количественная зависимость между скоростью сфероидизации и скоростью охлаждения помогла установить закономерности изменения физико-химических свойств жидкого металла во времени, а также оценить влияние этих изменений на механизм формообразования. В зависимости от соотношения времени сфероидизации и времени охлаждения капли может реализовываться сферическая, несферическая или осколочная форма частиц.

Большое внимание влиянию вязкости на процесс распыления уделяется в работах [28,71,80]. Так, в работе [28] указывается, что помимо мощности газового потока и температуры распыляющего газа эффективность распыления и форма частиц определяется температурой и вязкостью жидкости, при этом отмечается, что помимо температуры вязкость также зависит от газонасыщенности металла, наличия труднорастворимых примесей и т.д. Кроме того, вязкость образующихся капель в результате окисления металла становится выше вязкости металла в струе, особенно заметно это при диспергировании расплавов, имеющих в своем составе элементы, обладающие высоким сродством к кислороду. Окисление металла в процессе распыления [81] может приводить к образованию на поверхности капли тугоплавких включений, что снижает жидкотекучесть и препятствует сфероидизации капли. В таких условиях целесообразным может быть распыление в инертной среде.

Часть исследователей утверждала, что введение в расплав добавок, уменьшающих поверхностное натяжение жидкости, улучшает условия распыления. Однако Е. Пельцель [9] также отмечает, что действие некоторых добавок (алюминий, марганец, цинк) не только уменьшает поверхностное натяжение, но и приводит к образованию на поверхности капель твердых оксидов, что отрицательно сказывается на форме частиц. В условиях, когда размер капли составляет несколько десятков микрон, образование тугоплавких оксидов на поверхности капли, не меняя значение вязкости внутри объема, резко увеличивает сопротивление капли деформирующим усилиям, что в первом приближении может быть воспринято как повышение вязкости. Другими словами, сферическая форма частиц реализуется в том случае, когда окислы, образующиеся на поверхности капли, в условиях распыления находятся в жидком или газообразном состоянии, однако в последнем случае возникает вероятность получения высокопористых и даже пустотелых частиц, что приводит к уменьшению их плотности, а, следовательно, к уменьшению плотности получаемых изделий.

Следует отметить, что наличие в расплаве элементов, обладающих высоким сродством к кислороду и образующих с ним тугоплавкие соединения, не ограничивается влиянием на условия сфероидизации капли при распылении и вызывает увеличение энергетических затрат на дробление струи [7]. Особенно сильное увеличение энергетических затрат заметно на примере дробления мелких капель. Так Б.Н. Путимцев в своих работах [76,77] пришел к выводу о том, что присутствие в составе сплава таких элементов, как кремний и алюминий оказывает существенное влияние на гранулометрический состав получаемого порошка. Любопытно, что наличие этих добавок влияет на условия дробления струи неоднозначно: низкое содержание элементов (до 5%) повышает эффективность дробления за счет раскисления металла, повышение содержания приводит к образованию тугоплавких оксидных пленок, препятствующих дроблению.

Ю.А. Грацианов [29], исследуя распыление железо-алюминиевых сплавов, пришел к выводу о том, что при высоком содержании алюминия (до 16 %) окислы

последнего образуются даже при содержании кислорода в дутье около 1% (распыление в струе азота). Влияние химического состава сплава на форму частиц также было неоднозначным: сферическая форма частиц реализовывалась при содержании алюминия в расплаве до 1 %, неправильная – при содержании от 1-4% и осколочной – при содержании 16%. Изменение формы частиц объяснялось изменением толщины оксидной пленки при разных содержаниях алюминия что объяснялось разной толщиной и структурой оксидной пленки.

В работах по распылению железо-кремнистых сплавов с содержанием кремния до 16% отмечается, что интенсивное ошлакование металла негативно сказывается на эффективности его дробления, а сферичность порошка снижается при увеличении содержания кремния от 0,3 до 1%, но возрастала при дальнейшем увеличении содержания. Стоит отметить, что в отличие от алюминия, при наличии в расплаве более 4% кремния частицы порошка получались сферическими при условии распыления его азотом. Большое значение для процесса распыления имеет также форма включений, особенно сильное увеличение вязкости наблюдается в случае образования включений с формой, отличной от сферической [51].

При определении количественных характеристик процесса дробления капли в газовой струе используются понятия первой и второй критической скорости,  $W_{кр1}$  соответствует началу дробления капли,  $W_{кр2}$  – интенсивному дроблению капли, сопровождающемуся образованием множества мелких капель. Так М.С. Волынский [25] на основании экспериментов показал, что  $W_{кр1}$  соответствует  $We=10,7$ , а  $W_{кр2}$  достигается при  $We>14$ .

С.В. Бухман [19] при расчете численных критериев дробления различных жидкостей учитывал собственную скорость движения капли, полученные результаты представлены в таблице 1.8. Значения критерия Вебера, полученные Волынским и Бухманом, существенно отличаются. В то же время величина критерия дробления, рассчитанная Клячко [37], составила 3,75, Прандтлем [74] – 7,5, Лышевским [31,87] – 6,9-7,5. Противоречия в результатах исследований обусловлены различием и несовершенством методик, используемых в работах.

Таблица 1.8. Критерии дробления капель различных жидкостей

Жидкость	$\sigma$ , кгс/м	$d_k$ , мм	$W_g$ , м/с	$W_k$ , м/с	$We_{кр1}$	$We_{кр2}$
Вода	0,0073	2,48	9,3	2,3	4	2,3
Спирт	0,0023	1,39	8,4	2,6	2,6	2,2
Глицерин	0,0063	2,25	10,5	3,1	3,1	2,3

В процессе диспергирования жидкого металла происходит интенсивное охлаждение материала. Охлаждение металла при распылении – сложный процесс, в процессе охлаждения падает растворимость газов в металле, что ведет к газовыделению, кроме того, на скорость охлаждения влияют химические реакции между элементами, входящими в состав сплава, и кислородом воздуха. При этом такие важные технологические характеристики порошка, как форма частиц и структура металла, напрямую зависят от характера и скорости изменения теплофизических свойств расплава. Таким образом, процесс теплообмена определяет характер взаимодействия расплава с энергоносителем и окружающей средой.

В начальный момент времени капля, образовавшаяся при дроблении струи, движется в газовом потоке в расплавленном состоянии и обладает некоторым количеством тепла  $Q_\Sigma$ :

$$Q_\Sigma = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (1.15)$$

где  $Q_1$  – теплота, выделяемая при охлаждении капли от температуры расплава до температуры кристаллизации;

$Q_2$  – скрытая теплота кристаллизации (плавления);

$Q_3$  – теплота, выделяемая при охлаждении капли от температуры кристаллизации до температуры газа.

Ничипоренко [55] приводит формулы для вычисления  $q_1$ ,  $q_2$ , времени охлаждения капли до температуры затвердевания, и рассчитывает соотношение времени охлаждения капли до температуры плавления к времени между началом и концом кристаллизации.

Важнейшими критериями, используемыми при описании процесса теплообмена, являются критерий Рейнольдса (характеризует режим движения

жидкости), критерий Прандтля (характеризует физические свойства охлаждающей среды), критерий Нусельта (безразмерный коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции).

$$Pr = \frac{\mu_g \cdot c_g}{\lambda_g}, \quad (1.16)$$

где  $c_g$  – удельная теплоемкость газа;

$\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности газа.

$$Nu = f(Re, Pr); \quad (1.17)$$

Процессы нагрева и охлаждения дисперсного материала, движущегося в потоке газа, характеризуются теми же закономерностями теплообмена, что и процессы, происходящие с единичной частицей. Исследованиями теплообмена между частицами и газовым потоком в разные годы занимались многие исследователи [15,26,27,31,34,38,41,47,53,82,87,90]. Данные, полученные экспериментальным путем, согласуются с разными источниками. Так для описания ламинарного процесса, характеризующегося  $Re < 150$ , наиболее близким является выражение, полученное А.П. Сокольским [87]:

$$Nu = 2 + 16 \cdot Re^{0.65}; \quad (1.18)$$

Для процессов, характеризующихся значением  $Re=150-3 \cdot 10^4$ , Д.Н. Ляховский [47] предлагает другое выражение для определения числа Нусельта:

$$Nu = 0,62 \cdot \sqrt{Re}; \quad (1.19)$$

Большинством исследователей, изучавшим разрушение капель под воздействием второй критической скорости, отмечается схожесть процессов разрушения струй и капель, при которых степень деформации и вероятность разрушения определяется соотношением аэродинамического напора газового потока, способствующего разрушению и сил поверхностной энергии, препятствующих разрушению. В связи с этим при изучении процессов дробления капли и струи могут использоваться одни и те же критериальные уравнения.



Теоретическим анализом механизма дробления капель в разные годы занимались Вебер [2], Прандтль [74], М.С. Волинский [25,35,39,43-46], А.С. Лышевский [43,44,46].

Работы, представляющие интерес для автора при написании данной диссертации, можно разделить на несколько групп:

- классические работы в области теории дробления жидких струй, исследующие процессы разрушения струй под действием развивающихся в них собственных колебаний и базирующиеся на фундаментальных науках – аэро- и гидромеханике;

- работы, посвященные изучению процессов диспергирования струй жидкого топлива, рассматривает истечение и разрушение струй, вытекающих из отверстий под большим давлением;

- работы по исследованию процессов получения распыленных метастабильных жидкостей (расплавы металлов);

- работы, посвященные попыткам математического и компьютерного моделирования процессов диспергирования жидкостей в струе газа;

- работы, посвященные оборудованию по распылению жидкостей в струе газа.

Стоит отметить, что работы, относящиеся к первым двум группам, посвящены механике процессов дробления жидкостей, не затвердевающих при комнатных температурах, однако могут быть использованы при изучении процессов диспергирования метастабильных жидкостей.

На основе литературного обзора был сделан вывод о том, что определяющими факторами при диспергировании высокотемпературной метастабильной жидкости являются величина напора энергоносителя при контакте со струей жидкости, взаимодействие отдельных элементов расплава в металлогазовом факеле, химическое взаимодействие элементов расплава с газовым потоком, а также изменение физических свойств жидкости в процессе распыления. Однако сложность проведения экспериментов при температуре выше 1000°C, большое количество факторов и высокая скорость процесса являются

причиной того, что на сегодняшний день процессы диспергирования высокотемпературных жидкостей изучены недостаточно, отсутствует четкая методика определения требуемых технологических параметров, что является проблемой при необходимости создания технологии и оборудования для получения материала с узким фракционным составом.

Таким образом, по результатам проведенного литературного обзора были сформулированы цель и задачи исследований.

Целью работы является создание гидропневмоагрегатов машины по получению порошков, предназначенных для использования в технологиях селективного лазерного спекания.

Задачами исследования является:

1. Разработка гидропневмоагрегатов установки по получению порошков с заданными характеристиками на основе метода распыления жидкого металла газовой струей.

2. Разработка методики расчета диаграмм технологических режимов работы гидропневмоагрегатов установки по получению порошков методом распыления жидких металлов газовой струей.

3. Установление экспериментальных связей между параметрами процесса получения порошков распылением жидких металлов газовой струей и характеристиками получаемого порошка.

## 2. РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВ РАСПЫЛЕНИЕМ РАСПЛАВА

Производителям металлических порошков методами диспергирования при разработке технологии приходится решать ряд задач. Помимо требований к гранулометрическому составу материала, в зависимости от дальнейшего использования для обеспечения необходимых значений прессуемости, формуемости, текучести, насыпной плотности к порошкам предъявляются требования по форме частиц. Наиболее эффективное воздействие на форму частиц оказывает непосредственно процесс распыления [8,49,50,52,54], поэтому наряду со скоростью диспергирующей струи газа в работе необходимо выбрать оптимальное сочетание технологических факторов, которое обеспечит не только гарантированное дробление расплава до требуемых размеров, но и соотношение скоростей дробления, охлаждения и сфероидизации металла. Задача осложняется необходимостью минимизации энергозатрат ввиду высокой стоимости электроэнергии и ограниченности эксплуатационных свойств огнеупорных материалов.

В данной главе рассмотрены основные процессы, происходящие в при диспергировании расплава, такие, как распад струи, дробление и затвердевание капель, оценена зависимость эффективности дробления струи и особенностей процесса формообразования частиц порошка от различных технологических параметров процесса распыления и от природы распыляющего газа. Также приведены расчеты параметров процесса, необходимых для получения микропорошков необходимого размера.

### 2.1 Физические основы процесса распыления

Часто при кристаллизации расплава имеет место ликвация, что позже приводит к неравномерности свойств в объеме изделия и браку. Причем, чем более сложный состав у сплава, чем шире температурный интервал кристаллизации сплава, тем большее развитие получает ликвация. Различают дендритную ликвацию (проявляется в микрообъемах сплава, близких к размеру

зёрен), зональную (наблюдается во всём объёме слитка). Для устранения дендридной ликвации применяют длительный отжиг металла (гомогенизация). Для уменьшения зональной ликвации ограничивают размеры слитков, а также применяют специальные металлургические процессы: непрерывную разливку, переплав в водоохлаждаемом кристаллизаторе (электрошлаковый или вакуумный).

Одним из преимуществ изготовления изделий из распыленных порошков перед многими другими способами является равномерность химического состава сплава в объеме детали. Расплавление и перегрев металла позволяют усреднить химический состав, а последующее быстрое охлаждение при распылении не позволяет развиваться ликвации.

В процессе дробления струи образуются элементы неопределенной формы и различных размеров, испытывающие на себе деформирующие воздействие газовой струи, а также сил вязкости и поверхностного натяжения. Одним из основных критериев, определяющих режим дробления, является критерий Вебера (рисунок 2.1).

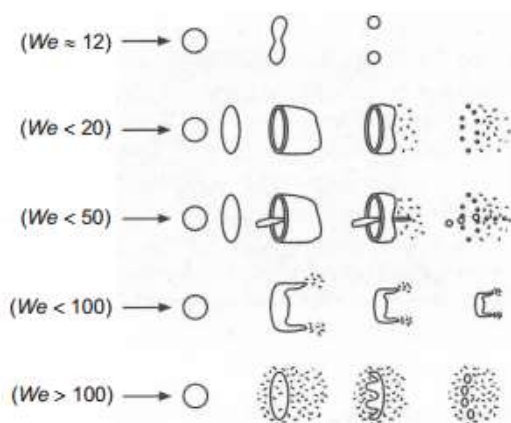


Рисунок 2.1. Режимы дробления капли

С увеличением значения числа Вебера режим дробления капли переходит от простого деления (размер вторичных капель близок по порядку величины к размеру основных) к разрушению со срывом поверхностного слоя (результатом являются мелкие капли, наряду с крупными каплями, отделяющимися от

первоначальной капли), а далее – к взрывному распаду, при котором образуются капли, значительно отличающиеся по размеру от первоначальной.

Процесс распыления [55] высокотемпературных жидкостей сопряжен с образованием двухфазных систем газ — жидкость и газ — твердое тело, называемых в целом металлогазовый факел. При распылении происходит взаимодействие газового потока с расплавом, а также взаимодействие отдельных капель.

Сложность изучения этих процессов обусловлена несколькими факторами: изменением агрегатного состояния в процессе распыления; изменением химического состава, а, следовательно, и свойств распыляемого материала, в результате взаимодействия с распыляющим газом; высокими скоростями процессов охлаждения и дробления металла; высокими температурами процессов создают трудности для работы измерительного оборудования.

Схема процесса, предложенная в работе, условно может быть разделена на 2 стадии: движение жидкого металла по каналу подачи в распылительную форсунку и непосредственно процесс дробления жидкой струи при контакте с газовым потоком. Характеристика получаемого порошка будет зависеть от скорости струи жидкости и температуры жидкости к моменту распыления, которые будут обусловлены характером движения жидкости по каналу подачи, а также от параметров газовой струи. Таким образом, в работе проводились расчеты для обеих стадий.

## 2.2 Расчет движения жидкого металла в системе

Одним из важных технологических параметров процесса, влияющих на гранулометрический состав порошка, является значение давления наддува герметичной рабочей полости печи. От величины давления наддува рабочей области напрямую зависит скорость движения по каналу, а, следовательно, и удельный расход газа при распылении.

Для точной оценки влияния величины давления наддува рабочей области на скорость движения металла по кварцевому каналу были проведены расчеты с учетом результатов компьютерного моделирования (ANSYS CFX) газовой струи для форсунки, модель которой представлена на рисунке 2.2. Результаты моделирования приведены в Приложениях 1-4.

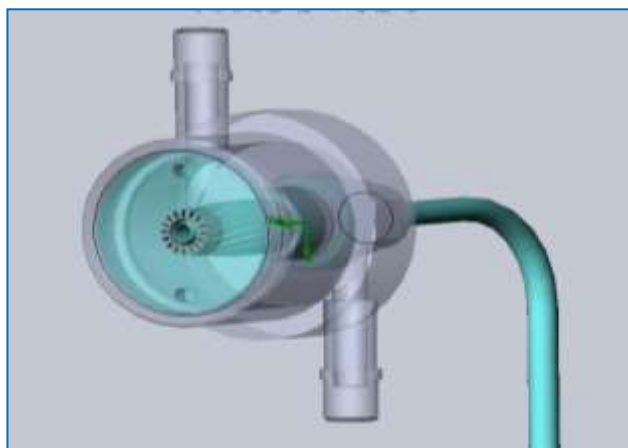


Рисунок 2.2. Модель распыляющей форсунки

Вытеснение расплава из рабочего пространства плавильного агрегата в распылительную форсунку для схемы (рисунок 2.3), используемой в работе описывается системой уравнений (20)

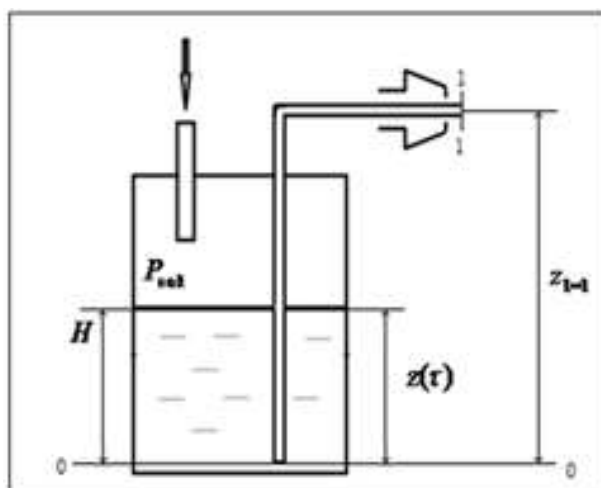


Рисунок 2.3. Схема принудительной подачи жидкого металла в распылительную форсунку

$$\begin{cases} \frac{P_{0-0}}{\rho_{ж} \cdot g} + \frac{v_{0-0}^2}{2 \cdot g} = \frac{P_{1-1}}{\rho_{ж} \cdot g} + \frac{v_{1-1}^2}{2 \cdot g} + z_{1-1} + \Sigma \Delta h_{п} \\ P_{0-0} = P_{над} + \rho \cdot g \cdot z(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

где  $P_{0-0}$  – давление в сечении 0-0, Па;

$P_{1-1}$  – давление в сечении 1-1, Па;

$P_{\text{над.}}$  – давление наддува рабочей полости плавильного агрегата, Па;

$v_{0-0}$  – скорость струи жидкости в сечении 0-0, м/с;

$v_{1-1}$  – скорость струи жидкости в сечении 1-1, м/с;

$z(\tau)$  – зависимость уровня зеркала металла относительно входа в канал подачи расплава от времени, м;

$z_{1-1}$  – уровень форсунки относительно входа в канал подачи расплава, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\Sigma\Delta h_{\text{п}}$  – суммарные потери напора между сечениями 0-0 и 1-1, м.

Для стационарного процесса принимаем условие  $v_0=v_1$  и получаем

$$\frac{P_{\text{над.}} + \rho \cdot g \cdot z(\tau)}{\rho \cdot g} = \frac{P_{1-1}}{\rho \cdot g} + z_{1-1} + \Sigma\Delta h_{\text{п}}; \quad (2.2)$$

Откуда следует, что выражение для определения уровня металла в момент времени имеет вид

$$z(\tau) = \frac{P_{1-1}}{\rho \cdot g} - \frac{P_{\text{над.}}}{\rho \cdot g} + z_{1-1} + \Sigma\Delta h_{\text{п}}; \quad (2.3)$$

Массовый расход металла определяется системой

$$\begin{cases} G = v_{F-F_0}(\tau) \cdot (F - F_0) \cdot \rho_{\text{ж}} \\ G = v_{F_0}(\tau) \cdot F_0 \cdot \rho_{\text{ж}} \end{cases} \quad (2.4)$$

где  $F_0$  – внутреннее сечение канала подачи расплава, м<sup>2</sup>;

$F$  – площадь зеркала металла в плавильном агрегате, м<sup>2</sup>;

$v_{F-F_0}$  – скорость движения уровня металла в плавильном агрегате, м/с;

$v_{F_0}$  – скорость движения столба жидкости в канале подачи расплава, м/с.

Изменение уровня металла составит

$$dz = \frac{F_0}{(F - F_0)} \cdot v_{F_0}(\tau) \cdot d\tau \quad (2.5)$$

Тогда уровень зеркала металла относительно входа в канал подачи расплава в момент времени составит

$$z(\tau) = H - \frac{F_0}{(F - F_0)} \cdot \int_0^{\tau} v_{F_0}(\tau) \cdot d\tau \quad (2.6)$$

При постоянной скорости получаем

$$z(\tau) = H - \frac{F_0}{(F - F_0)} \cdot v_{F_0}(\tau) \cdot \tau \quad (2.7)$$

Из выражений (43) и (47) получаем равенство

$$\frac{P_{1-1}}{\rho \cdot g} - \frac{P_{\text{над}}}{\rho \cdot g} + z_{1-1} + \Sigma \Delta h_{\text{п}} = H - \frac{F_0}{(F - F_0)} \cdot v(\tau) \cdot \tau \quad (2.8)$$

И зависимость скорости движения расплава по каналу подачи в момент времени от давления наддува рабочей полости плавильного агрегата

$$v(\tau) = \frac{(H - \frac{P_{1-1}}{\rho \cdot g} + \frac{P_{\text{над}}}{\rho \cdot g} - z_{1-1} - \Sigma \Delta h_{\text{п}})(F - F_0)}{F_0 \cdot \tau} \quad (2.9)$$

Величина суммарных потерь напора обусловлена потерями на трение и местными потерями и может быть определена из выражения

$$\Sigma \Delta h_{\text{п}} = \Delta h_{1\text{вх}} + \Delta h_{2\text{верт}} + \Delta h_{3\text{пов}} + \Delta h_{4\text{гориз}} + \Delta h_{5\text{вых}} \quad (2.10)$$

где  $\Delta h_{1\text{вх}}$  – потери напора на гидравлическом сопротивлении на входе в канал, м;

$\Delta h_{2\text{верт}}$  – потери напора на гидравлическом сопротивлении на вертикальном участке канала, м;

$\Delta h_{3\text{пов}}$  – потери напора на гидравлическом сопротивлении в повороте канала, м;

$\Delta h_{4\text{гориз}}$  – потери напора на гидравлическом сопротивлении на горизонтальном участке канала, м;

$\Delta h_{5\text{вых}}$  – потери напора на гидравлическом сопротивлении на выходе из канала, м.

Величины местных потерь определялись на основе формулы Вейсбаха

$$\Delta h = \xi \cdot \frac{v^2(\tau)}{2 \cdot g} \quad (2.11)$$

где  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления.



Коэффициенты местного сопротивления на входе ( $\xi_1$ ) и выходе ( $\xi_2$ ) из трубы равняются 1.

Для участка трубы диаметром  $D$  и длиной  $L$  справедливо выражение

$$\xi = \lambda_{\text{т}} \cdot \frac{L}{D} \quad (2.12)$$

где  $\lambda_{\text{т}}$  – коэффициент потерь на трение по длине.

Для прямолинейных участков канала подачи расплава для определения значения коэффициента потерь на трение по длине использовалась формула Альтшуля

$$\lambda_{\text{т}} = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} \quad (2.13)$$

где  $\Delta$  – величина шероховатости материала канала, м.

Коэффициент местного сопротивления составляет

$$\xi_3 = 0,00175 \cdot \frac{\lambda_{\text{пов}} \cdot \delta \cdot R_0}{d} \quad (2.14)$$

где  $\lambda_{\text{пов}}$  – коэффициент потерь на трение в повороте;

$R_0$  – радиус поворота канала, м;

Для определения  $\lambda_{\text{пов}}$  использовался коэффициент  $X$

$$X = \text{Re} \cdot \sqrt{\frac{d}{R_0}} \quad (2.15)$$

Коэффициент потерь на трение в повороте в зависимости от величины  $X$  может быть рассчитан следующим образом:

Для  $X < 600$

$$\lambda_{\text{пов}} = \frac{20}{\text{Re}^{0,65}} \left( \frac{d}{2R_0} \right)^{0,175} \quad (2.16)$$

Для  $600 < X \leq 1400$

$$\lambda_{\text{пов}} = \frac{10,4}{\text{Re}^{0,55}} \left( \frac{d}{2R_0} \right)^{0,225} \quad (2.17)$$

Для  $X \geq 1400$

$$\lambda_{\text{пов}} = \frac{5}{\text{Re}^{0.45}} \left( \frac{d}{2R_0} \right)^{0.275} \quad (2.18)$$

Остывание металла в канале происходит за счет теплопередачи через стенку и излучения. Удельный тепловой поток составляет

$$q_{\text{т}} = \frac{\pi}{d_{\text{вн}}} \cdot k \cdot (T_{\text{ж}} - T_{\text{в}}), \quad (2.19)$$

где  $T_{\text{ж}}$  – температура жидкого металла, °С;

$T_{\text{к}}$  – температура воздуха, °С.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_{\text{вн}}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{\text{SiO}_2}} \cdot \ln \frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{\text{нар}}}}, \quad (2.20)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от жидкости к стенке канала, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр канала подачи жидкости, м;

$\lambda_{\text{SiO}_2}$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;

$d_{\text{нар}}$  – наружный диаметр канала подачи жидкости, м;

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от стенки канала к окружающей среде, Вт/м<sup>2</sup>·К.

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{ж}} \cdot d_{\text{вн}} \cdot \rho_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ж}}}, \quad (2.21)$$

Учитывая, что первая порция металла при скачкообразном повышении давления проходит по каналу с большой скоростью, и замерзания металла при этом не происходит, принимаем условие, что в период равномерного движения расплава трубка прогрета до температуры металла. При данном условии  $(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) = 0$ , что позволяет нам пренебрегать естественной конвекцией, а режим течения жидкости принимать вязкостным.

Для  $40 < \text{Re} < 2300$  справедливо выражение

$$\text{Nu} = C \cdot \left( \frac{\text{Pe} \cdot d_{\text{вн}}}{l} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{\mu_1}{\mu_k} \right) \cdot \varepsilon, \quad (2.22)$$

где  $\text{Pe}$  – число Пекле;

$l$  – длина канала, м;

$\mu_1$  – коэффициент вязкости металла на входе в канал,  $\text{Г} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$ ;

$\mu_k$  – коэффициент вязкости металла при температуре стенки канала,  $\text{Г} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$ ;

$\varepsilon$  – поправка на участок гидродинамической стабилизации.

Так как  $\mu_1 = \mu_k$  выражение (2.22) приобретает форму

$$\text{Nu} = C \cdot \left( \frac{\text{Pe} \cdot d_{\text{вн}}}{l} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \varepsilon; \quad (2.23)$$

$$\text{Pe} = \text{Re} \cdot \text{Pr}; \quad (2.24)$$

$$0,08 \leq \frac{\mu_k}{\mu_1} \leq 10 \Rightarrow C = 1,55$$

$$\varepsilon = 1 + 0,01 \cdot \left( \frac{\text{Re} \cdot d_{\text{вн}}}{l} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \psi; \quad (2.25)$$

Для расчетов процессов охлаждения принимаем  $\psi = 1$ .

Удельный тепловой поток за счет излучения находим по закону Стефана-Больцмана

$$q_{\text{изл}} = \varepsilon_{\text{ж}} \cdot \sigma \cdot \left( \left( \frac{T_{\text{ж}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 \right), \quad (2.26)$$

где  $\varepsilon_{\text{ж}}$  – степень черноты,

$\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Суммарный тепловой поток  $q_{\Sigma}$  равен

$$q_{\Sigma} = q_{\text{конв}} + q_{\text{изл}}; \quad (2.27)$$

Падение температуры можно определить из выражения

$$G_{\text{м}} \cdot c_{\text{м}} \cdot (T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}}) = q_{\Sigma} \cdot F_{\text{ж}}, \quad (2.28)$$

где  $G_M$  – массовый расход металла, кг/с;

$F_{ж}$  – площадь поверхности металла,  $m^2$ .

Результаты расчета зависимости температуры металла на выходе из канала подачи от скорости движения металла представлены на рисунках 2.4, 2.5.



Рисунок 2.4. Зависимость падения температуры жидкого чугуна на выходе из канала подачи от скорости движения

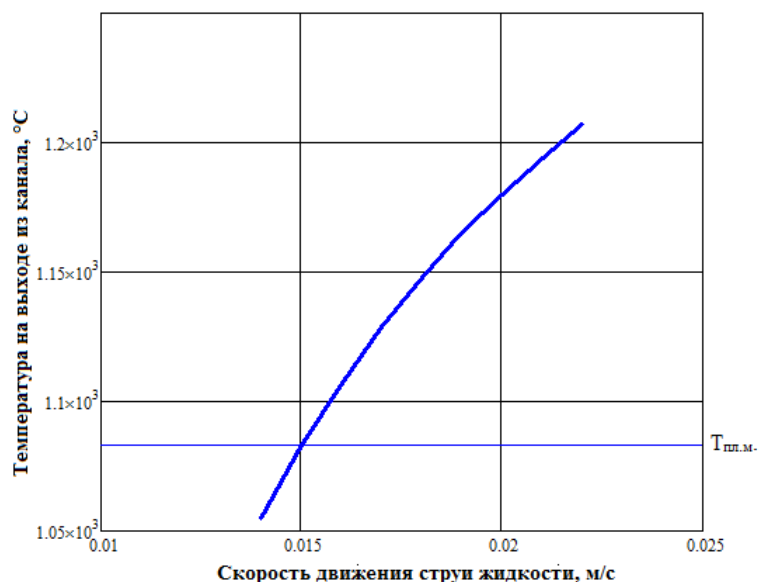


Рисунок 2.5. Зависимость падения температуры жидкой меди на выходе из канала подачи от скорости движения

Очевидно, что более эффективное дробление струи металла будет реализовано при малом расходе металла. Таким образом, для выбора

оптимального режима подачи металла в распылительную форсунку, необходимо оценить минимальное значение давления наддува рабочей полости плавильного агрегата, при котором не происходит застывание металла. Результаты расчета зависимости средней скорости движения расплава по каналу подачи от на рисунках 2.6, 2.7.

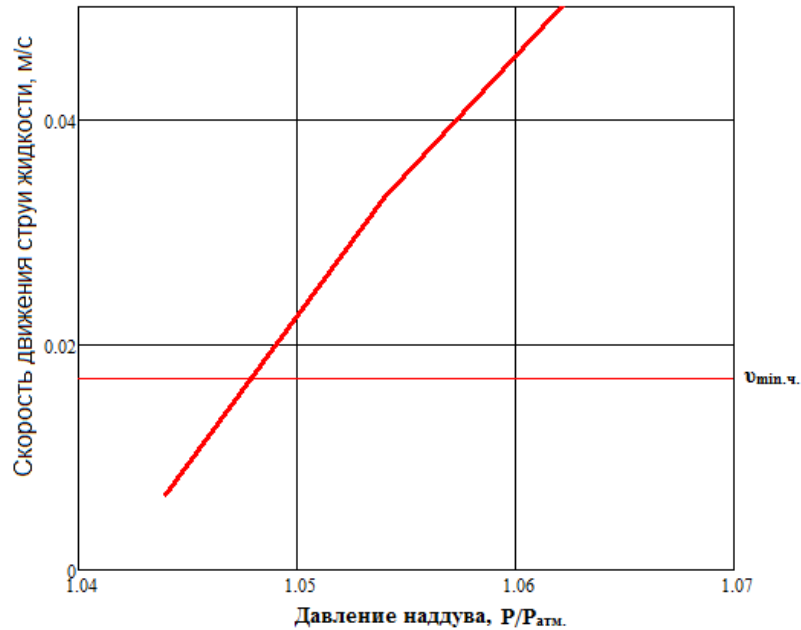


Рисунок 2.6. Зависимость скорости движения жидкого чугуна по каналу подачи от давления наддува рабочей полости плавильного агрегата

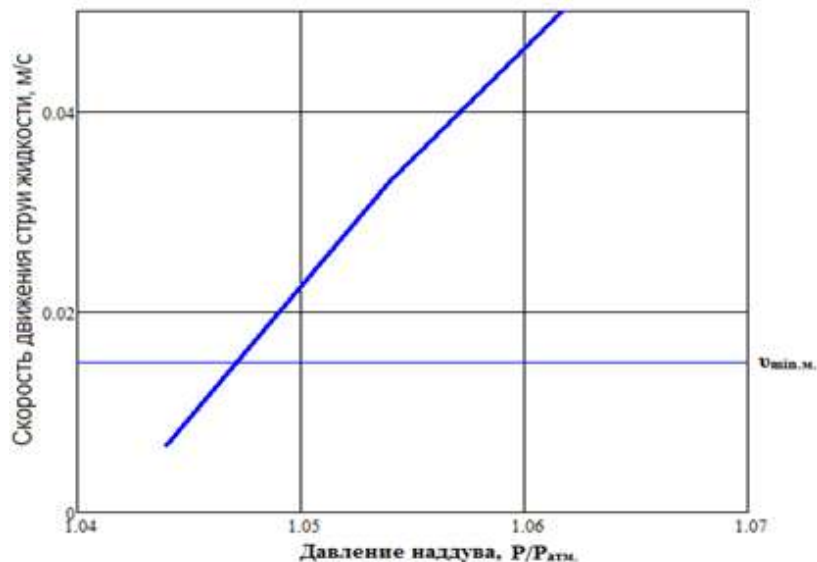


Рисунок 2.7. Зависимость скорости движения жидкой меди по каналу подачи от давления наддува рабочей полости плавильного агрегата

По результатам расчетов был сделан вывод о том, что во избежание застывания жидкости в канале, как для варианта с вытеснением жидкого чугуна, так и для варианта с вытеснением жидкой меди, необходимо обеспечить величину давления наддува рабочей полости плавильного агрегата более 1,05 атм.

### 2.3 Расчет процесса распыления

В работе стояла задача получения металлических порошков из расплавов меди и чугуна марки СЧ-15. В качестве энергоносителя выступали воздух и аргон при температуре  $T=298$  К. Диаметр канала подачи расплава в форсунку составлял  $D_{тр}=0,0045$  м. Требуемый диаметр получаемых частиц – 50 мкм. Расчеты дробления струи металла проводили согласно методике, описанной в [55].

#### 2.3.1 Необходимая скорость струи

Главными факторами, определяющими деформацию и дробление капель в газовом потоке, являются скоростной напор газа и лапласовы силы, удерживающие каплю от разрушения. Неравенство, отражающее условие разрушения капли, можно представить в следующем виде

$$c_f \cdot \frac{\rho_r \cdot W_r^2}{2} \geq \frac{2 \cdot \sigma_{ж}}{d_k}, \quad (2.29)$$

где  $c_f$  – коэффициент аэродинамического сопротивления капли ( $c_f=1$ ).

Таким образом, минимальную скорость струи, при которой величина напора газа позволяет получать капли размером  $d_k$ , можно определить из формулы:

$$W^{d_k} = \sqrt{\frac{4 \cdot \sigma_{ж}}{c_f \cdot \rho_r \cdot d_k}}; \quad (2.30)$$

Принимаем  $W_{воз.}$  – скорость струи воздуха,  $W_{Ар}$  – скорость струи аргона. Согласно предварительным расчетам минимальная скорость струи, при которой величина напора газа позволяет получать капли размером 50 мкм для чугуна и меди составит:

$$W_{воз.-чуг.}^{\approx 50} = 233, м/с$$

$$W_{\text{воз.-Cu}}^{\approx 50} = 271, \text{ м/с}$$

$$W_{\text{Ar-чуг.}}^{\approx 50} = 199, \text{ м/с}$$

$$W_{\text{Ar-Cu}}^{\approx 50} = 231, \text{ м/с}$$

В расчетах применялись средние значения зависимостей изменения параметров газовой струи (Приложение А-Г) вдоль оси распылительной форсунки и периферийной линии оси канала подачи расплава (рисунок 2.8).

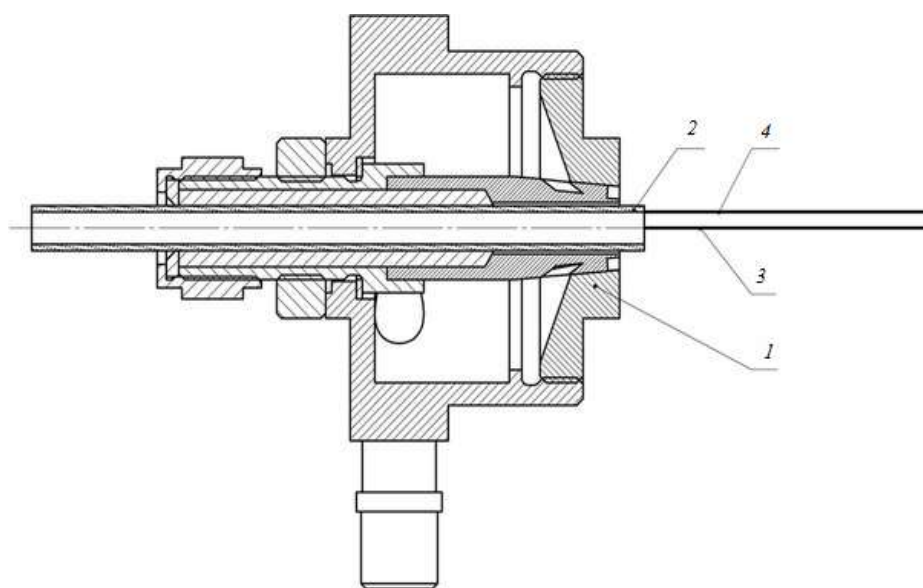


Рисунок 2.8. Схема распылительного узла установки распыления металлов УРМ-001:1 – распылительная форсунка, 2 – канал подачи расплава, 3 – линия оси распылительной форсунки, 4 – периферийная линия канала подачи расплава

Расчеты производились, исходя из условия, что максимально эффективно дробление струи жидкости будет происходить в той координате, где скорость газовой струи имеет максимальное значение, то есть на расстоянии, не превышающем 10 см, за срезом форсунки. В работе также рассматривался вариант использования горячего газа.

Результаты расчетов критической скорости, произведенных с учетом изменения плотности газа в струе, представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Критические скорости газовой струи для различных вариантов распыления

Жидкость	Газ-распылитель	$T_{\text{газа}}, ^\circ\text{C}$	$W^{50}, \text{ м/с}$
Чугун	воздух	27	248
Чугун	воздух	300	342
Чугун	аргон	27	207
Чугун	аргон	300	285
Медь	воздух	27	265
Медь	воздух	300	365
Медь	аргон	27	221
Медь	аргон	300	299

### 2.3.2 Время дробления струи жидкого металла

Дробление струи жидкого металла потоком сжатого газа происходит с образованием элементов неопределенной формы и различных размеров. Под действием газового потока эти элементы распадаются на отдельные мелкие капли, движущиеся в потоке газа и испытывающие на себе ударное воздействие потока, а также сил вязкости и поверхностного натяжения.

Процесс формирования частиц порошка помимо дробления жидкого металла до необходимых размеров включает в себя формообразование частиц. Для получения частиц сферической формы необходимо, чтобы продолжительность дробления струи и сфероидизации капель была меньше времени охлаждения металла. Теоретический анализ некоторых особенностей процесса формообразования был приведен в работах [65,69,86].

В работе рассчитывали время дробления расплавов чугуна и меди в струе воздуха и аргона. В начальный момент соприкосновения струи расплава с газовым потоком образуется капля размером  $d_0$

$$d_0 = 1,5d_{\text{ст}} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\text{We}(d_{\text{ст}})}}, \quad (2.31)$$

где  $d_{\text{ст}}$  – радиус струи металла, м.

Размер первоначальной капли, образующейся при разрушении струи расплава при соприкосновении с газовым потоком, достаточно велик, а время



существования мало. Поэтому [55] охлаждения металла в этот период не происходит. Таким образом, временем дробления в данном случае считаем время дробления первоначально образующейся капли.

Время дробления капли радиусом  $r_0$  согласно [1] составит

$$\tau_{др.} = \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ж.} \cdot d_0^3}{2 \cdot \sigma_{ж.}}}; \quad (2.32)$$

### 2.3.3 Время сфероидизации капли

Капля металла, образующаяся в процессе деформации цилиндрической струи, обладает неправильной формой и под действием сил поверхностного натяжения стремится принять сферическую форму. Эта форма обладает наименьшей поверхностью при постоянном объеме частицы, что соответствует минимуму свободной поверхностной энергии на границе раздела. Таким образом, в работе продолжительность сфероидизации капли оценивалась, как время, необходимое для образования сферы из пряди, образовавшейся в первый момент диспергирования.

Время сфероидизации капли может быть рассчитано по формуле [55]:

$$\tau_{сф} = \frac{3 \cdot \pi \cdot \mu_{ж.} \cdot (r_{к.} - r_{ц.})}{\sigma_{ж.}}, \quad (2.33)$$

где  $r_{к.}$  – радиус частицы после затвердевания, м;

$r_{ц.}$  – радиус исходной цилиндрической частицы, м.

Если принять [55], что цилиндр имеет отношение длины к диаметру, равное 10, то, принимая равенство объемов цилиндра и шара, мы вычисляем соотношение радиусов капли и цилиндра

$$\frac{4 \cdot \pi \cdot r_{к.}^3}{3} = \pi \cdot r_{ц.}^2 \cdot 20 \cdot r_{ц.}; \quad (2.34)$$

Тогда

$$\tau_{сф} = \frac{1,785 \cdot \pi \cdot d_{к.} \cdot \mu_{ж.}}{2 \cdot \sigma_{ж.}}; \quad (2.35)$$

При определении суммарного времени деформации следует учитывать время критической деформации исходной капли и время сфероидизации капли, так как охлаждение жидкости происходит на всех перечисленных этапах. Таким образом, суммарное время деформации, соответствующее отрезку времени от начала дробления струи до появления шарообразной капли составит:

$$\tau_{\text{деф.}} = \tau_{\text{др.}} + \tau_{\text{сф.}}; \quad (2.36)$$

#### 2.3.4 Время охлаждения капли

Газ в камеру форсунки подается при температуре, существенно меньшей температуры плавления распыляемых металлов, поэтому процесс диспергирования сопровождается интенсивным охлаждением расплава. Процесс теплообмена является одним из важнейших факторов, определяющих взаимодействие расплава с энергоносителем и окружающей средой. Структура металла и форма частиц во многом определяется скоростью охлаждения капли. Таким образом, необходимо провести расчет скорости охлаждения металлов различными газами и оценить эффективность подогрева дутья для увеличения времени охлаждения капель металла.

Как было сказано выше, в начальный момент времени капля, образовавшаяся при дроблении струи, движется в газовом потоке в расплавленном состоянии и обладает некоторым количеством тепла, являющимся суммой теплоты, выделяемой при охлаждении капли от температуры расплава до температуры кристаллизации, скрытой теплоты кристаллизации и теплоты, выделяемой при охлаждении капли от температуры кристаллизации до температуры газа. Нас интересовало время охлаждения капли до застывания, так как именно в этот период определяется форма частицы. В период охлаждения от начальной температуры до температуры кристаллизации капля находится в жидком состоянии. После достижения температуры кристаллизации в жидкости начинают появляться центры кристаллизации. Сравнительно большой размер интересующих нас капель (порядка 50 мкм) дает возможность предположить, что затвердевание материала в объеме будет происходить неравномерно, а выделение

скрытой теплоты кристаллизации – в период, когда капля будет частично находиться в жидком состоянии. Последующее охлаждение до температуры газа происходит уже в твердом состоянии. Таким образом, для расчета времени затвердевания капли необходимо учитывать  $q_1$  и  $q_2$ , а время полного затвердевания капли можно оценить, как сумму  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

Время охлаждения капли до температуры, превышающей температуру плавления, определяется из выражения

$$\tau_{\text{охл}} = \frac{c_p \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot d_{\text{к}}^2}{6 \cdot \text{Nu} \cdot \lambda_{\text{г}}} \ln \frac{T_{\text{м}} - T_{\text{г}}}{T_{\text{к}} - T_{\text{г}}}, \quad (2.37)$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость металла, Дж/°С;

$\lambda_{\text{г}}$  – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·°С);

$T_{\text{м}}$  – температура металла, °С;

$T_{\text{г}}$  – температура распыляющего газа, °С;

$T_{\text{к}}$  – температура капли, °С.

Для удобства в расчеты вводится коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{г}} \cdot \text{Nu}}{d_{\text{к}}}; \quad (2.38)$$

Расчеты проводились для капли размером 50 мкм. Критерий Нуссельта представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции. В работе [32] приводится эмпирическая формула для определения числа Нуссельта

$$\text{Nu} = 2 + 0,03 \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot \text{Re}^{0,54} + 0,35 \cdot \text{Pr}^{0,356} \cdot \text{Re}^{0,58}; \quad (2.39)$$

Теплофизические свойства газов [20]:

$$c_{\text{в}} = 1,0005 + 1,1904 \cdot 10^{-4} \cdot T; \quad (2.40)$$

$$\mu_{\text{в}} = 0,544 \cdot 10^{-6} \cdot T^{0,62}; \quad (2.41)$$

$$\lambda_{\text{в}} = 0,37 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0,748}; \quad (2.42)$$

$$\mu_{\text{Ar}} = 4 \cdot 10^{-7} \cdot T^{0,718}; \quad (2.43)$$

$$\lambda_{\text{Ar}} = 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot T^{0,77}; \quad (2.44)$$

Теплоемкость аргона с изменением температуры меняется незначительно. В расчетах принимали  $c_{Ar}=519$  Дж/(кг·К).

Согласно [55], принимая теплоту, воспринимаемую газовым потоком, равной теплоте кристаллизации, а также, предполагая, что процесс идет без изменения температуры, для определения времени выделения скрытой теплоты кристаллизации можно использовать следующее выражение

$$\tau_{кр} = \frac{\lambda_{кр} \cdot m}{\frac{Nu \cdot \lambda_r}{d_k} \cdot (T_{кр} - T_r) \cdot F}, \quad (2.45)$$

где  $\lambda_{кр}$  – удельная теплота кристаллизации, Дж/кг;

$m$  – масса капли, кг;

$T_{кр}$  – температура кристаллизации, °С;

$F$  – площадь поверхности капли, м<sup>2</sup>.

Если принять, что капля имеет сферическую форму, то справедливо выражение

$$\tau_{кр} = \frac{\lambda_{кр} \cdot d_k^2 \cdot \rho_{ж}}{6 \cdot Nu \cdot \lambda_r \cdot (T_{кр} - T_r)}; \quad (2.46)$$

Суммарное время остывания металла вычислялось по формуле

$$\tau_{ост} = \tau_{охл} + \tau_{кр}; \quad (2.47)$$

Очевидно, что сферическая форма частиц порошка реализуется в том случае, если дробление и сфероидизация капель металла происходит быстрее, чем застывание металла, другими словами, если выполняется условие:  $\tau_{ост} > \tau_{деф}$ .

Для оценки отношения суммарного времени остывания капли ко времени дробления использовался коэффициент  $k$

$$k = \frac{\tau_{др}}{\tau_{деф}}; \quad (2.48)$$

Для оценки отношения суммарного времени остывания капли к суммарному времени деформации использовался коэффициент  $n$

$$n = \frac{\tau_{ост}}{\tau_{деф}}; \quad (2.49)$$

Ниже представлены результаты расчетов процесса распыления чугуна и меди в струе воздуха и аргона для частиц диаметром 50 мкм. Основными технологическими параметрами процесса распыления, обуславливающими механизм дробления и режим охлаждения металла, являются скорость струи газа и температура металла. На рисунках 2.9-2.16 показаны результаты сочетания данных параметров с точки зрения возможности получения металлических порошков со сферической формой частиц. Граничными условиями являлись:

- 1) критическая скорость дробления металла для данного газа;
- 2) возможности распыляющей форсунки;
- 3) температура кристаллизации металла;
- 4) максимальная температура жидкого металла, приемлемая с точки зрения энергоэффективности процесса и условий работы футеровки.

На графиках представлены различные области:

- невозможность процесса дробления;
- недостаточная эффективность дробления (малая скорость струи газораспылителя);
- ограничение условий работы оборудования;
  - застывание металла до окончательного дробления;
- условия, обеспечивающие дробление металла до необходимых размеров и допустимое время охлаждения капель.

Результаты расчетов дробления расплава для капли размером 50 мкм представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Результаты расчетов процесса дробления

Жидкость	Газ-распылитель	$T_{\text{газа}}, ^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{др}}, \text{c}$	$\tau_{\text{сф}}, \text{c}$	$\tau_{\text{охл}}, \text{c}$	$\tau_{\text{кр}}, \text{c}$	k	n
Чугун	воздух	27	$7,82 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	$3,29 \cdot 10^{-4}$	$5,08 \cdot 10^{-4}$	1,07	1,07
Чугун	воздух	300	$7,84 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	$3,65 \cdot 10^{-4}$	$5,69 \cdot 10^{-4}$	1,19	1,19
Чугун	аргон	27	$8,7 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	$5,11 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$	1,50	1,49
Чугун	аргон	300	$7,75 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	$5,71 \cdot 10^{-4}$	$8,89 \cdot 10^{-4}$	1,88	1,88
Медь	воздух	27	$7,95 \cdot 10^{-4}$	$4,04 \cdot 10^{-7}$	$4,48 \cdot 10^{-4}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$	2,21	2,21
Медь	воздух	300	$7,99 \cdot 10^{-4}$	$4,04 \cdot 10^{-7}$	$5,02 \cdot 10^{-4}$	$1,49 \cdot 10^{-3}$	2,49	2,49
Медь	аргон	27	$8,83 \cdot 10^{-4}$	$4,04 \cdot 10^{-7}$	$6,97 \cdot 10^{-4}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$	3,10	3,10
Медь	аргон	300	$7,88 \cdot 10^{-4}$	$4,04 \cdot 10^{-7}$	$7,85 \cdot 10^{-4}$	$2,32 \cdot 10^{-3}$	3,94	3,94

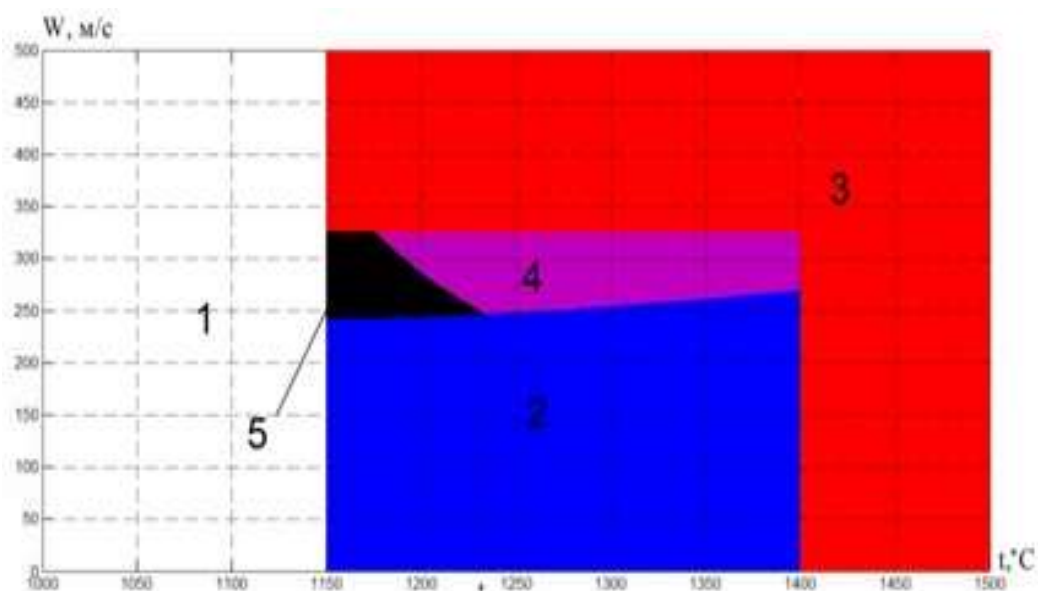


Рисунок 2.9. Области технологических параметров процесса распыления жидкого чугуна в струе воздуха (температура воздуха  $27^\circ\text{C}$ ): 1 – распыление невозможно, 2 – недостаточная степень дробления расплава, 3 – технологические ограничения оборудования, 4 – достаточные условия, 5 – преждевременное затвердевание капель металла в процессе распыления

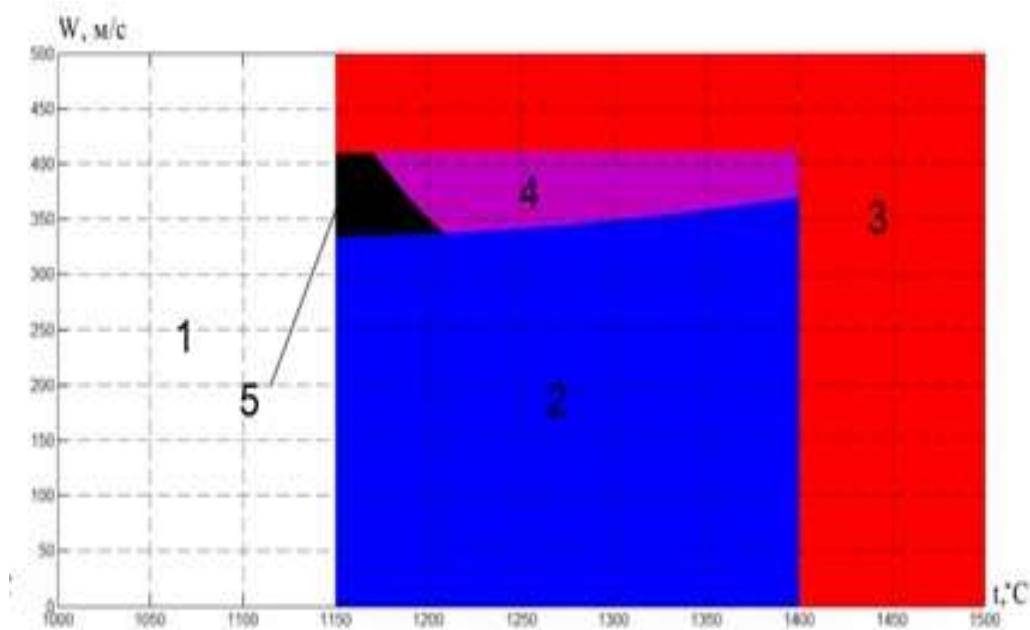


Рисунок 2.10. Области технологических параметров процесса распыления жидкого чугуна в струе воздуха (температура воздуха 300°C): 1 – распыление невозможно, 2 – недостаточная степень дробления расплава, 3 – технологические ограничения оборудования, 4 – достаточные условия, 5 – преждевременное затвердевание капель металла в процессе распыления

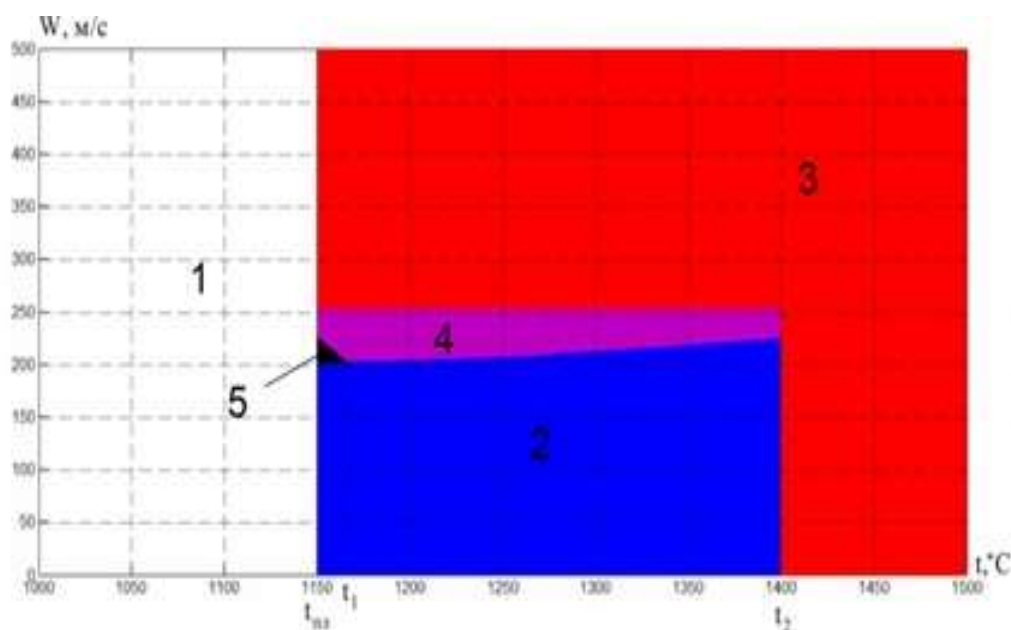


Рисунок 2.11. Области технологических параметров процесса распыления жидкого чугуна в струе аргона (температура аргона 27°C): 1 – распыление невозможно, 2 – недостаточная степень дробления расплава, 3 – технологические ограничения оборудования, 4 – достаточные условия, 5 – преждевременное затвердевание капель металла в процессе распыления

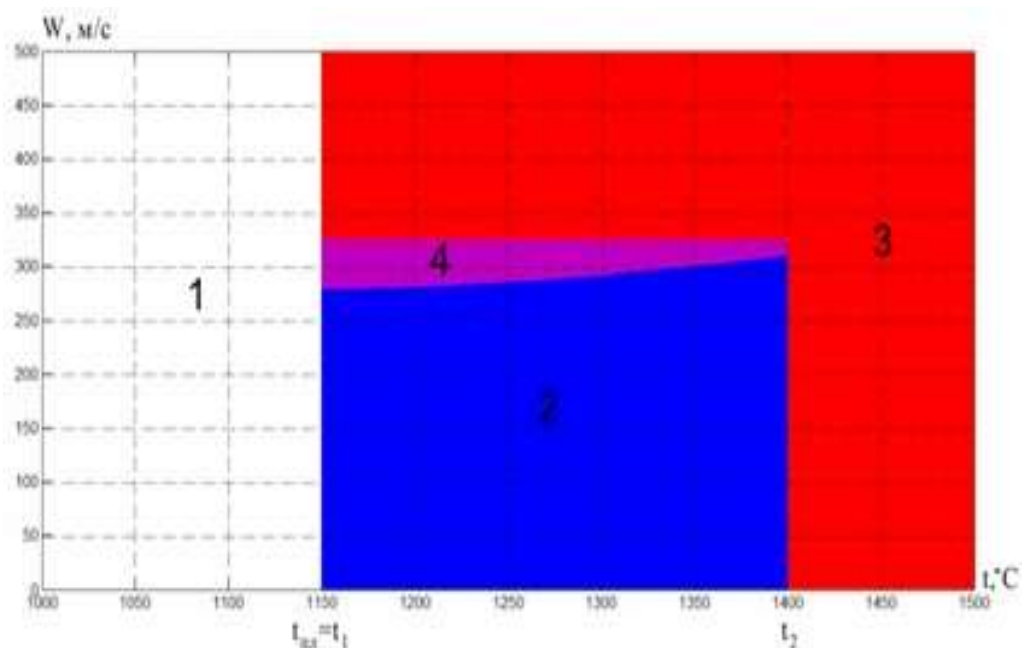


Рисунок 2.12. Области технологических параметров процесса распыления жидкого чугуна в струе аргона (температура аргона 300°C): 1 – распыление невозможно, 2 – недостаточная степень дробления расплава, 3 – технологические ограничения оборудования, 4 – достаточные условия, 5 – преждевременное затвердевание капель металла в процессе распыления

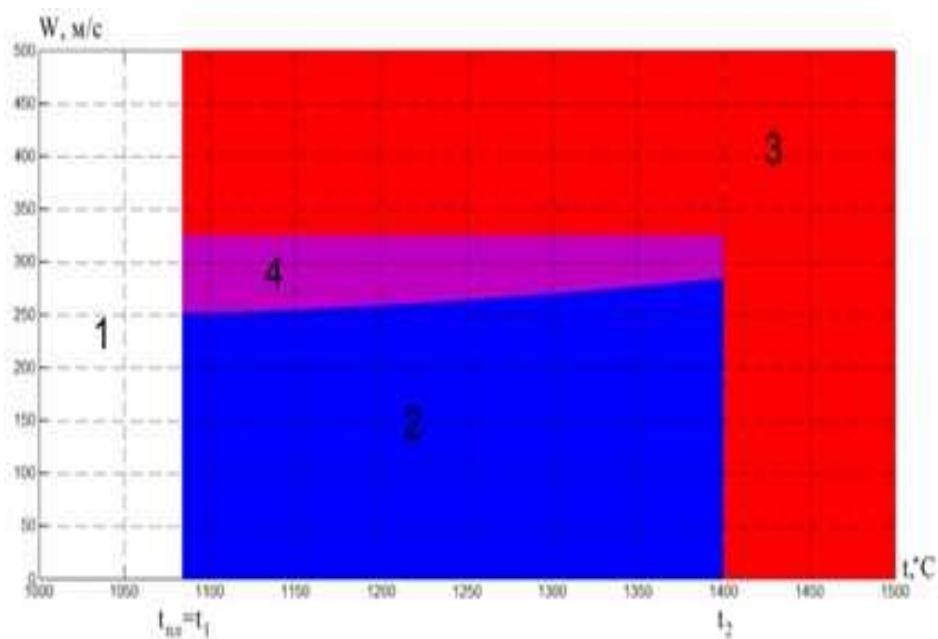


Рисунок 2.13. Области технологических параметров процесса распыления жидкой меди в струе воздуха (температура воздуха 27°C): 1 – распыление невозможно, 2 – недостаточная степень дробления расплава, 3 – технологические ограничения оборудования, 4 – достаточные условия



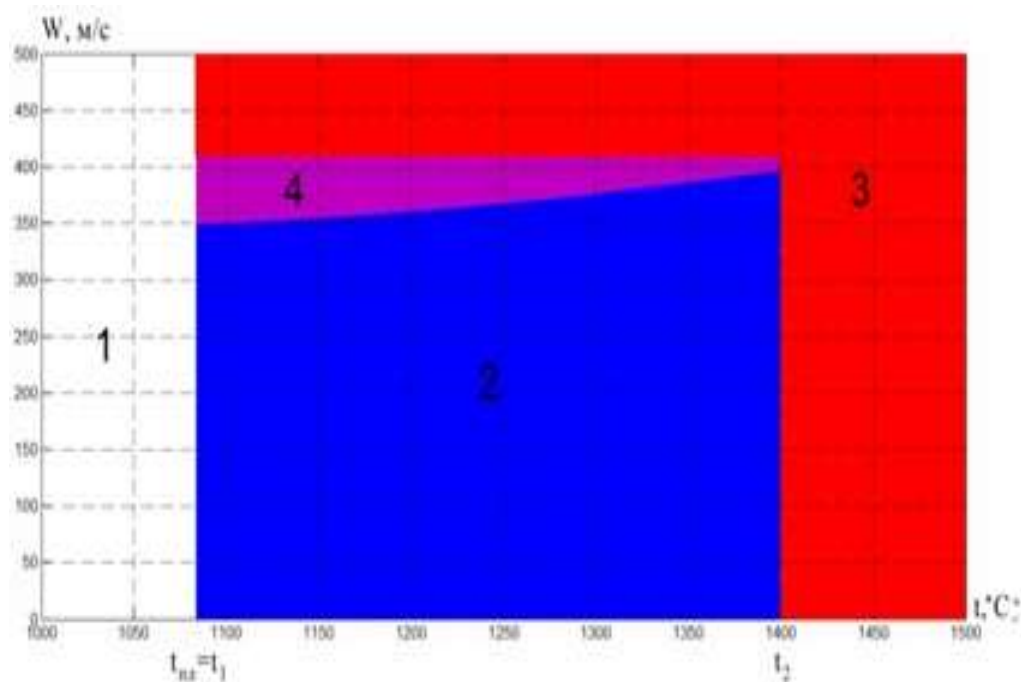


Рисунок 2.14. Области технологических параметров процесса распыления жидкой меди в струе воздуха (температура воздуха 300°C): 1 – распыление невозможно, 2 – недостаточная степень дробления расплава, 3 – технологические ограничения оборудования, 4 – достаточные условия

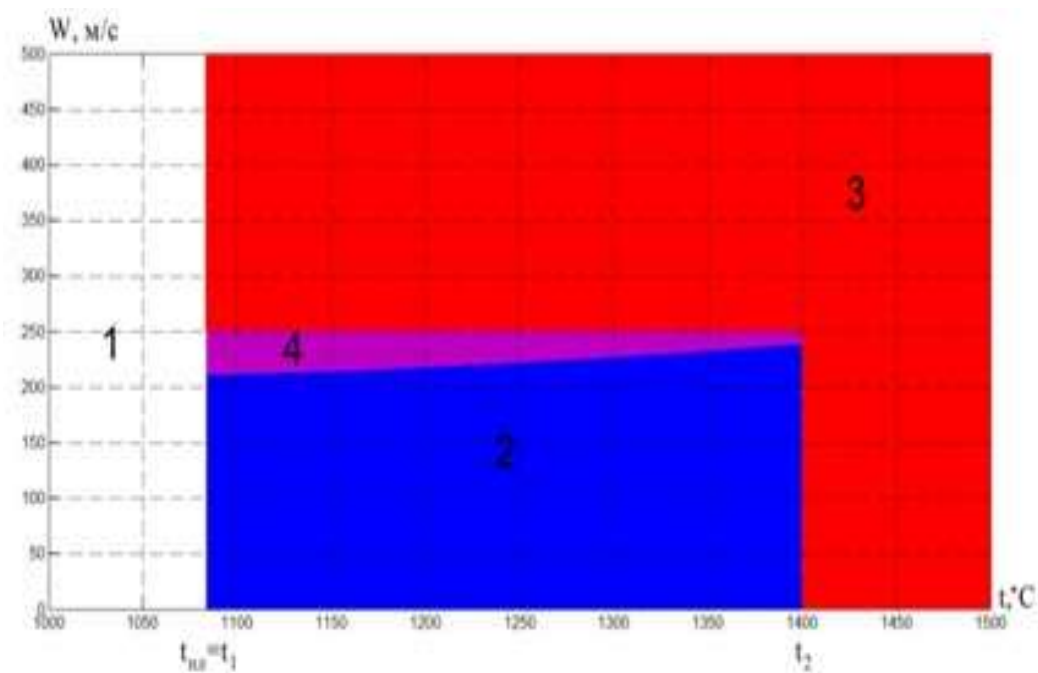


Рисунок 2.15. Области технологических параметров процесса распыления жидкой меди в струе аргона (температура аргона 27°C): 1 – распыление невозможно, 2 – недостаточная степень дробления расплава, 3 – технологические ограничения оборудования, 4 – достаточные условия

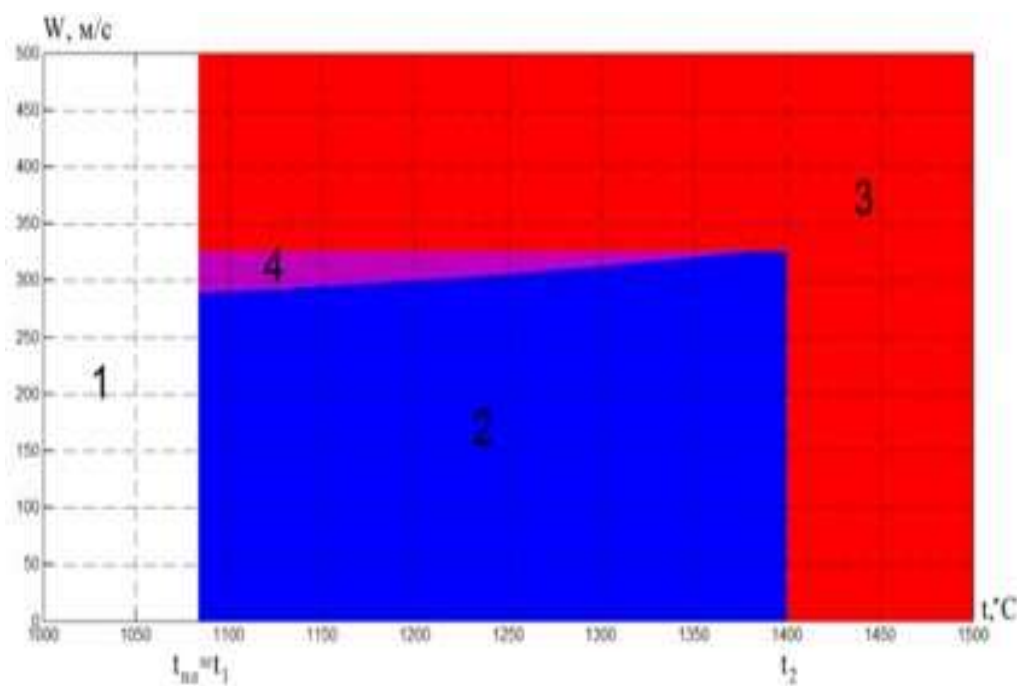


Рисунок 2.16. Области технологических параметров процесса распыления жидкой меди в струе аргона (температура аргона 300°C): 1 – распыление невозможно, 2 – недостаточная степень дробления расплава, 3 – технологические ограничения оборудования, 4 – достаточные условия

Из анализа графиков можно сделать следующие выводы:

1. Значение критической скорости при использовании в качестве распыляющего газа аргона значительно меньше, чем в случае использования воздуха. Очевидно, это связано с большей плотностью аргона. В то же время скорость струи аргона при одинаковом давлении в рабочей камере форсунки, согласно данным моделирования, значительно меньше скорости воздуха, что понижает верхнюю границу области допустимых значений технологических параметров. Таким образом, использование аргона в качестве распыляющего газа оправдано при необходимости предотвращения химического взаимодействия компонентов газа с расплавом, однако не оказывает существенного влияния на эффективность дробления расплава.

2. На графиках отсутствует область, соответствующая получению порошка с необходимым размером частиц неправильной (несферической) формы. Это объясняется малой долей времени сфероидизации капель в общем времени

деформации металла. Другими словами, достижение режима распыления, при котором суммарное время остывания будет больше времени дробления, должно являться достаточным условием для получения частиц не только требуемого размера, но и сферической формы. Отсюда следует, что неправильная форма частиц при распылении чугуна и меди может объясняться только изменением физических свойств расплавов, являющемся результатом химических реакций металлов с распыляющим газом.

3. Из рисунков 2.12-2.16 видно, что при распылении меди практически исключен вариант, при котором металл застынет в процессе дробления до момента достижения размера капли 50 мкм. Это объясняется большим значением теплоты кристаллизации, время выделения теплоты кристаллизации меди в среднем составляет 75% от общего времени остывания капли. Другими словами, даже если распыление металла начинается при температуре плавления, то при условии достаточной скорости струи распыляющего газа, диспергирование до 50 мкм произойдет раньше, чем капля затвердеет. В то же время на рис.7-9 присутствует область, соответствующая преждевременному затвердеванию металла. Это объясняется тем, что величина теплоты кристаллизации чугуна меньше, чем величина теплоты кристаллизации меди. Таким образом, перегрев металла выше температуры плавления (для случая устоявшегося режима распыления) имеет смысл только при распылении чугуна.

4. Нагрев газа-распылителя до 300°С с одной стороны приводит к сужению (или ликвидации в случае нагрева аргона) области преждевременного затвердевания при распылении чугуна. С другой стороны, изменение плотности газа при нагреве приводит к тому, что увеличивается критическая скорость струи газа, соответствующая каплям необходимого размера. Однако, как было сказано выше, область преждевременного застывания металла отсутствует в случае распыления меди. Таким образом, нагрев газа имеет смысл только в случае невозможности или нецелесообразности перегрева металла и только для случаев распыления чугуна.

По результатам расчетов, приведенных в главе 2, были определены области технологических параметров, обеспечивающие стабильность процесса распыления и необходимые параметры получаемых порошков.

### 3. ОБОРУДОВАНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

#### 3.1 Установка распыления металлов УРМ-001

Как правило, процесс распыления жидких металлов определяется тремя основными факторами: скорость газовой струи, температура жидкости, температура рабочего газа. Однако регулирование процесса распыления изменением этих параметров затруднительно: перегрев жидкости повышает энергозатраты процесса и ухудшает условия работы футеровки; увеличение температуры рабочего газа требует повышения энергетических затрат, но основным эффектом при этом является более равномерное распределение частиц порошка по размерам – эффективность дробления при этом увеличивается незначительно; что касается изменения скорости движения газовой струи, то изменение этого параметра в широком диапазоне затруднительно, так как эффективное использование такого оборудования, как компрессор, требует работы в определенных режимах.

Таким образом, как правило, подбор режимов распыления жидкости при необходимости получения порошка определенного гранулометрического состава является процессом сложным и часто сопряжен с дополнительными энергетическими затратами. Схема распыления жидкого металла, основанная на вытеснении расплава из рабочей камеры плавильного агрегата в распыляющую форсунку под давлением, дает ряд преимуществ, главным из которых является возможность регулирования гранулометрического состава получаемого порошка изменением величины давления наддува рабочей полости плавильного агрегата. Давление наддува влияет на скорость движения жидкости в канале подачи, а, следовательно, на удельный расход распыляющего газа.

На основе выводов, представленных в главе 1, и расчетов процесса дробления, представленных в главе 2, была разработана схема (рисунок 3.1), изготовлен эскиз (рисунок 3.2) и создана установка распыления жидких металлов УРМ-001 (патент №110312 от 20.11.2011г.)(рисунок 3.3).

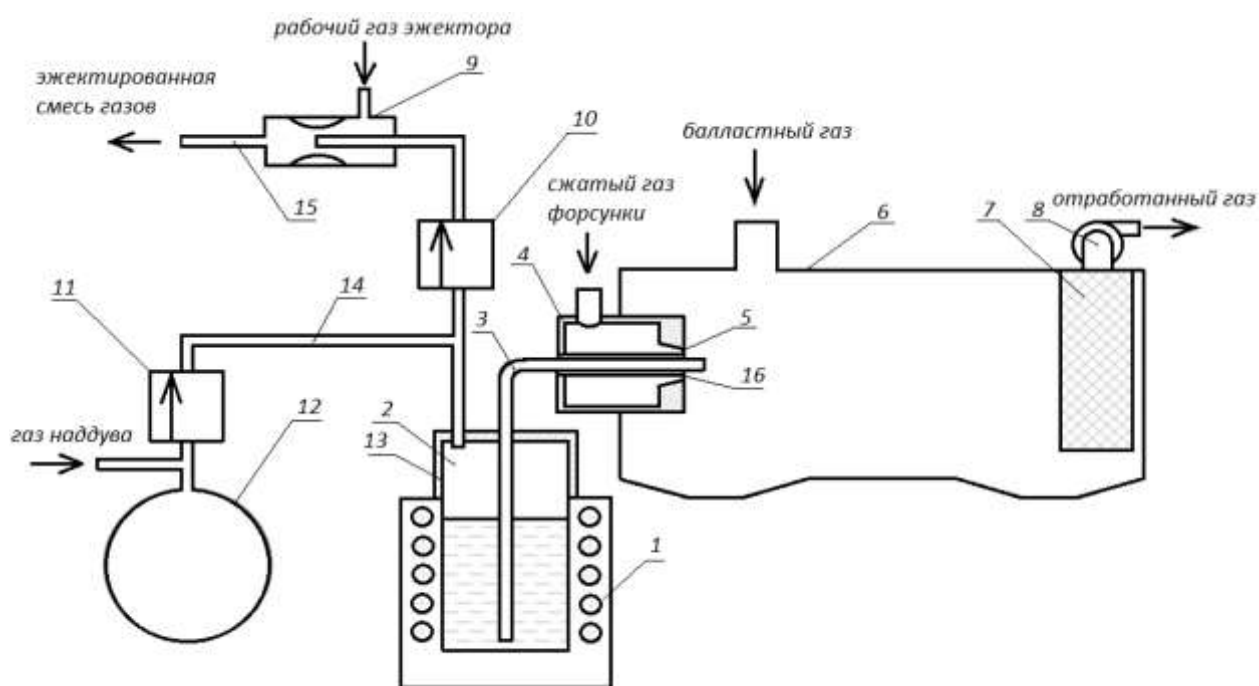


Рисунок 3.1. Схема установки распыления жидких металлов УРМ-001: 1-плавильная печь, 2 – герметичная рабочая полость, 3 - вертикальный канал подачи расплава, 4 – распылительная форсунка, 5 – кольцевой канал выхода газа, 6 - бункер, 7 - рукавный фильтр, 8 - вытяжной вентилятор, 9 – эжектор, 10, 11 – управляющие клапаны, 12 - накопительная емкость со сжатым газом, 13 – герметизирующая крышка, 14, 15 – каналы подвода и отвода вытесняющего газа, 16 - центральное сквозное отверстие

В плавильной печи 1 осуществляют выплавку металла с перегревом выше температуры плавления и с помощью накопительной емкости 12 и клапана большого проходного сечения 11 осуществляют последующий ударный наддув герметичной рабочей полости печи 2 сжатым, который вытесняет расплав по каналу 3 подачи расплавленного металла в распылительную форсунку 4. В распылительную форсунку 4 подают сжатый газ с регулируемой температурой и давлением на входе. При истечении газа из форсунки 4 через кольцевой канал 5 формируется кольцевая сходящаяся газодинамическая струя, которая взаимодействует с расплавом, подаваемым в центральную часть струи. В результате динамического контакта с газовым потоком происходит распыление расплава на капли, которые при этом резко охлаждаются и ускоряются газодинамической струей.

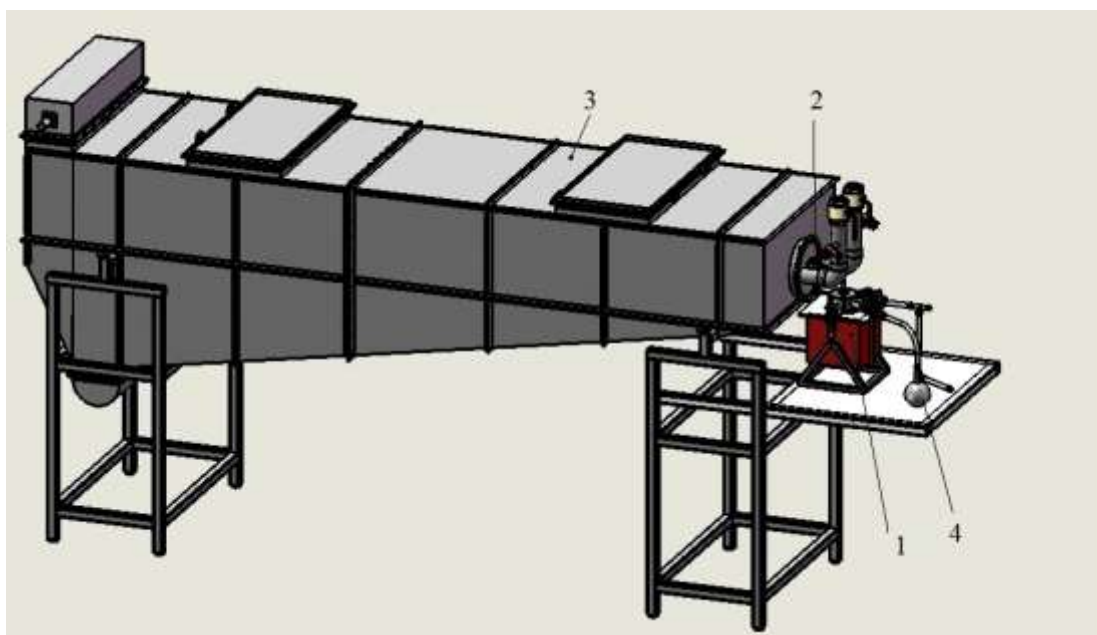


Рисунок 3.2. Эскиз установки распыления металлов УРМ-001: 1 – плавильный узел, 2 – распылительный узел, 3 – бункер, 4 – накопительная емкость со сжатым газом



Рисунок 3.3. Установка распыления металла УРМ-001

Выбор индукционной печи в качестве плавильного агрегата объясняется тем, что данный вид плавления характеризуется выделением тепла непосредственно в самом нагреваемом металле с минимальными потерями тепла. Кроме того, отсутствие внешнего источника тепла и электродов позволяет получать сплавы

высокой чистоты по содержанию углерода, газов, в индукционных печах обеспечивается высокая степень усвоения легирующих элементов и активных добавок, что очень важно при получении порошковых материалов требуемой чистоты с минимальным расходом дорогостоящих материалов. Процесс плавления легко автоматизируется, обеспечиваются благоприятные условия труда.

Выбор режима распыления осуществлялся с помощью блока управления (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4. Блок управления: 1- дисплей давления рабочего газа на входе, 2- дисплей давления газа наддува, 3- дисплей температуры рабочего газа в форсунке, 4- дисплей температуры в бункере, 5- индикатор главного клапана, 6- индикатор клапана наддува, 7- индикатор аргона, 8- индикатор клапана балластировки, 9- индикатор клапана продувки, 10- индикатор эжекции, 11- индикатор вентилятора вытяжки, 12- включение форсунки, 13- включение наддува, 14- продувка рукавов, 15- остановка, 16- освещение бункера, 17- индикатор нагревателя, 18- индикатор ошибки системы, 19- переключение рабочего газа аргон/воздух, 20- включение нагревателя, 21- включение питания, 22- выключение питания

Система управления служит для управления подводом и давлением газа, для обеспечения своевременного разряжения и наддува под крышкой, скорости газа в форсунке, а также контроля и вывода оперативной информации температуре газа и давлении в различных частях системы. Поддержание заданного давления



рабочего газа в системе обеспечивалось поршневым компрессором (в случае распыления воздухом) или стандартными баллонами (распыление аргоном).

Работа УРМ-001 характеризуется мгновенным началом процесса. Во избежание застывания первая порция жидкого металла должна пройти по кварцевому каналу (рисунок 3.5) с большой скоростью, что обеспечивается ударным наддувом герметичной камеры плавильного агрегата.



Рисунок 3.5. Процесс распыления жидкого металла в УРМ-001

Ударный наддув становится возможен благодаря использованию дополнительной емкости сжатого газа. Во избежание завихрений, вызывающих разбрызгивание жидкого металла под герметизирующей крышкой, газ в герметичную область подавался через отверстия вставки, выполненной в форме тора (рисунок 3.6).

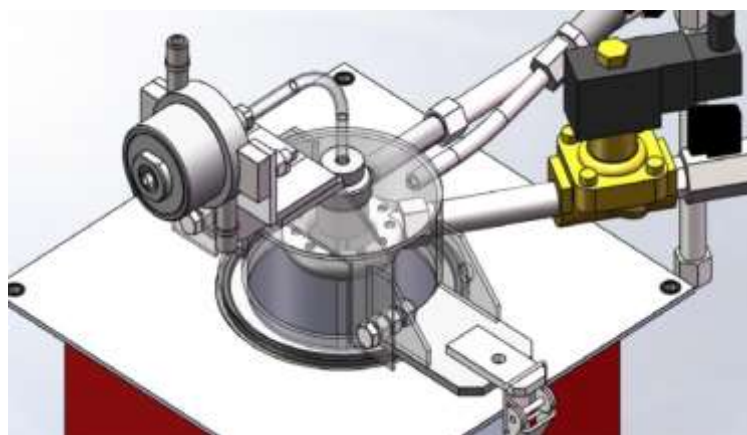


Рисунок 3.6. Эскиз распылительного узла установки УРМ-001

В качестве распыляющего газа использовался воздух и аргон.

### 3.2 Программа и методика исследования свойств микропорошков

Основными характеристиками микропорошков, рассматриваемыми в работе, были:

- гранулометрический состав;
- форма частиц;
- текучесть;
- насыпная плотность;
- структура металла (наличие или отсутствие полых частиц).

Кроме того, исследовалось изменение химического состава материала при распылении чугуна в струе воздуха. В работе использовались следующие методы исследования данных характеристик:

- Гранулометрический состав. Гранулометрический состав представлен содержанием фракций частиц по отношению к общему количеству в процентном соотношении. От гранулометрического состава зависит качество поверхности детали, полученной в процессе использования порошка, а также такая важная характеристика порошка, как насыпная плотность.

В работе гранулометрический состав определяли методом ситового анализа. Ситовый анализ представляет собой механическое разделение порошкового материала с помощью комплекта сит различных размеров, установленных на вибрационном столе. После просеивания производили взвешивание различных фракций и определяли гранулометрический состав порошкового материала. Порошок перед рассевом просушивали. Ситовый анализ наиболее простой и надежный способ определения гранулометрического состава порошка. Кроме того, при данном анализе появляется возможность выбора интересующих фракций материала.

- Форма частиц. Форма частиц порошкового материала является одним из наиболее важных параметров. Формой частиц во многом определяются текучесть и насыпная плотность порошка, поверхность конечного изделия. Принцип селективного лазерного спекания предполагает послойное нанесение и

выравнивание каждого последующего слоя порошка; эффективное выравнивание, а, следовательно, и качественная структура материала, возможна при использовании микропорошков со сферической формой частиц.

Косвенно о сферичности частиц можно судить по текучести материала, однако в работе проводилось дополнительное исследование материалов с помощью микроскопа Olympus BX-51 (для исследования материала в проходящем и отраженном свете).

Объектом исследования являются проекции частиц из положения наибольшей устойчивости (ГОСТ 25849-83) – изображение на экране микроскопа. Для определения формы частиц использовали факторы формы, представляющие собой отношения:

- максимального линейного размера проекции частицы ( $l_{\max}$ ) к ее минимальному размеру ( $l_{\min}$ );
- расстояния между касательными к крайним точкам проекций, параллельного направления движения препарата ( $d_F$ ), к хорде, делящей площадь проекции частицы на 2 равные части и параллельные направлению движения препарата ( $d_M$ );
- периметра проекции частицы ( $P$ ) к ее площади ( $S$ ).

Факторы  $l_{\max}/l_{\min}$  используются для характеристики степени неравноосности частиц.

Факторы  $d_F/d_M$  и  $P^2/S$  (второй предпочтительней) применяются для сравнения форм проекций с некоторой типовой конфигурацией частицы (например, имеющей минимальное отношение  $P^2/S$ ), а также для определения развитости поверхности частиц. Последняя оценивается сравнением с частицей некоторой усредненной формы с гладкой поверхностью, конфигурация проекции которой выбрана на основании фактора  $l_{\max}/l_{\min}$ .

Размеры проекций частиц в поле зрения препарата измеряли в микрометрах. При этом операцию измерений повторяли для последовательно возрастающего числа проекций до тех пор, пока при дальнейшем увеличении числа измерений проекций, измеряемый фактор перестанет изменяться более чем на 5%.

- Текучесть. Одним из основных параметров металлического порошка является текучесть, то есть способность с определенной скоростью вытекать из отверстий. Данный параметр крайне важен с производственной точки зрения для осуществления быстрой и непрерывной подачи порошка.

Текучесть порошка – сложная комплексная характеристика, зависящая от очень многих факторов (плотность материала, гранулометрический состав, форма и состояние поверхности частиц). Основным фактором является трение и сцепление частиц между собой, затрудняющее их взаимное перемещение. Остальные свойства порошков влияют на текучесть, уменьшая или увеличивая межчастичное трение и сцепление. Текучесть обычно уменьшается при уменьшении размеров частиц, так как тонкие порошки обладают большей удельной поверхностью. Увеличение шероховатости, усложнение форм частиц также уменьшают текучесть. Окисление порошков обычно повышает текучесть, так как при этом снижается коэффициент трения и сглаживается рельеф поверхности частиц, кроме случаев, когда образование тугоплавких оксидов негативно влияет на форму частиц. Значительно понижает текучесть влажность порошка.

В работе текучесть порошка определяли методом воронки. Метод основан на определении времени истечения порошков из воронки (рисунок 3.7), самопроизвольно просыпающихся через калиброванное выходное отверстие. Порошок испытывали в воздушно-сухом состоянии. Масса навески для одного испытания составляла 50 г. Пробу, отобранную для испытания, сушили в сушильном шкафу, оборудованном контактным термометром, при температуре  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  в течение 1 ч., затем охлаждали в эксикаторе до комнатной температуры.

Для проведения испытания использовали следующую аппаратуру: воронку из стали марки 12X18H10T твердостью HV 140, штатив; уровень брусковый; секундомер с погрешностью до 0,2 с; весы лабораторные.

Воронку укрепляли в штативе и устанавливали по уровню на горизонтальном основании, защищенном от встряхиваний и вибраций. Рабочую поверхность

воронки обезжиривали, протирая ватой, смоченной в спирте. Испытания проводили при относительной влажности воздуха не выше 80 %.

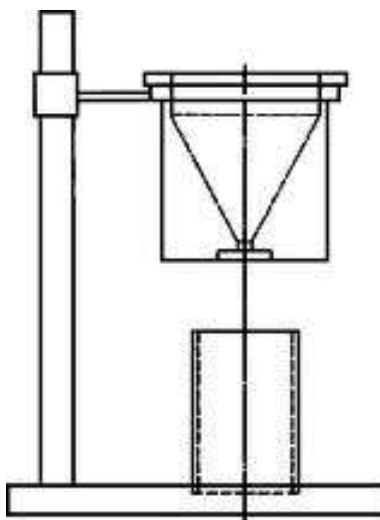


Рисунок 3.7. Схема калиброванной воронки и стойки, используемой при определении текучести и насыпной плотности порошка методом воронки

Навеску порошка массой 50 г, взвешенную с погрешностью до 0,1 г, высыпали в воронку с закрытым выходным отверстием. Выходное отверстие открывали, и порошок высыпается в приемник. Начало и конец истечения порошка из воронки фиксировали секундомером. За результат испытания принимали среднее арифметическое значение результатов пяти определений.

- Насыпная плотность. Одним из основных параметров металлического порошка является насыпная плотность. Насыпная плотность представляет собой массу единицы объема свободно насыпанного порошка и является объемной характеристикой. Насыпная плотность порошка определяется размером и формой его частиц, плотностью его укладки и состоянием поверхности, кроме того, действительной плотностью данного металла и плотностью укладки его частиц в данном объеме, то есть фактическим заполнением объема.

Насыпная плотность тем больше, чем крупнее частицы порошка и чем более компактной и правильной формой они обладают. Более высокую насыпную плотность обеспечивают сферические частицы. Практически во всех случаях с увеличением удельной поверхности (увеличении отклонения от сферичной

формы) порошков уменьшается их насыпная плотность, и наоборот. Наличие выступов и неровностей на поверхности частиц также уменьшает значение насыпной плотности, так как затрудняет взаимное перемещение частиц.

Большое значение имеет гранулометрический состав порошка, отражающий соотношение частиц различных размеров. Существенное влияние на насыпную плотность оказывает наличие тонких фракций в порошке. Как правило, увеличение их содержаний уменьшает насыпную плотность из-за образующихся пустот, с другой стороны мелкие фракции, заполняя промежутки между крупными частицами, увеличивают насыпную плотность. Поэтому для полидисперсных металлических порошков существует оптимальный гранулометрический состав, обеспечивающий максимальную насыпную плотность.

По величине насыпной плотности судят о пригодности для спекания свободно насыпанных порошков. С насыпной плотностью порошка тесно связана усадка при спекании, так как она отражает гранулометрический состав порошка. Чем меньше насыпная плотность, тем больше усадка.

Так как в процессе послойного лазерного сплавления механического уплотнения порошков не происходит – насыпная плотность наряду с текучестью является важнейшим параметром материала.

Для определения насыпной плотности порошков был выбран метод с использованием воронки. Данный метод предназначен для металлических порошков, свободно протекающих через отверстие диаметром 2,5 мм. Он может также быть использован для порошков, которые с трудом протекают через отверстие диаметром 2,5 мм, но свободно протекают через отверстие диаметром 5 мм.

Для определения использовали две воронки: одну с отверстием диаметром  $2,5 \pm 0,05$  мм, другую с отверстием диаметром  $5 \pm 0,05$  мм и цилиндрическую емкость вместимостью  $25 \pm 0,05$  см<sup>3</sup> и внутренним диаметром  $30 \pm 1$  мм. Воронки и емкость выполнены из немагнитного коррозионностойкого материала. Твердость материала и толщина стенок были достаточными, чтобы противостоять

деформации и чрезмерному износу. Внутренние поверхности емкости и воронок были отшлифованы. Воронка и емкость закреплялись в стойке с горизонтальным виброустойчивым основанием, при этом стойка фиксировала отверстие воронки на высоте 25 мм от верхнего края емкости; емкость и воронка устанавливались соосно. Для выполнения исследования на трех испытуемых порциях объем пробы составлял не менее 100 см<sup>3</sup>.

Испытание проводили следующим образом. Воронку с отверстием диаметром 2,5 мм заполняли порошком, закрыв выходное отверстие сухим пальцем. Затем пропускали порошок в емкость до тех пор, пока она не заполнялась, и порошок не начинал пересыпаться. С помощью немагнитной линейки выравнивали поверхность порошка однократным движением, не оказывая давления на порошок и следя за тем, чтобы емкость не подвергалась встряхиванию и вибрации. После выравнивания поверхности порошка производили легкое постукивание по емкости, чтобы порошок осел и не рассыпался при перемещении. Не допускалось наличие частиц, прилипших к емкости. Массу порошка определяли с точностью до 0,05 г.

Если порошок не протекал через воронку с отверстием диаметром 2,5 мм, то использовали воронку с выходным отверстием диаметром 5 мм.

Насыпную плотность вычисляли по уравнению

$$\rho_n = \frac{m}{V}, \quad (3.1)$$

где  $\rho_n$  – насыпная плотность, полученная методом воронки, кг/м<sup>3</sup>;  
 $m$  – масса порошка, кг;

$V$  – объем емкости, м<sup>3</sup>.

Однако сравнивать значения насыпной плотности различных материалов не корректно, поэтому в исследованиях использовалась величина относительной насыпной плотности, т.е. отношение плотности материалов к насыпной плотности порошков определялась по формуле:

$$\rho_{н.отн.} = \frac{\rho_n}{\rho_{мат.}}, \quad (3.2)$$

где  $\rho_{н.отн.}$  – относительная насыпная плотность порошка;

$\rho_{мат.}$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

- Структура металла. Структура металла применительно к порошкам, в первую очередь предполагает содержание полых частиц. Согласно различным источникам, механизм теплопереноса при значениях пористости свыше 70% значительно отличается от теплопереноса в сплошной среде, что приводит к ухудшению качества спеченного слоя. Таким образом, особенно в условиях отсутствия дополнительного уплотнения порошкового материала перед спеканием высокая пористость частиц порошка приведет к ухудшению теплопереноса при спекании, а значит – к ухудшению качества продукции.

Для определения структуры частиц порошка в работе применяли растровый микроскоп JSM-6400LV. Анализ проводился как на порошке, так и на шлифе порошка. Для изготовления шлифа использовался комплект полуавтоматического отрезного и шлифовально-полировального оборудования фирмы Struers (Германия).

- Химический состав. При контакте кислорода воздуха с каплями расплава происходит окисление элементов, имеющих высокое сродство к кислороду. В работе анализировалось изменение содержания углерода и кремния. Для обеспечения высокой точности в измерениях использовался не порошок, монолитная проба.

Подготовка проб для химического анализа включала 2 этапа:

1) сплавление порошка в печи Таммана в условиях, исключающей вторичное окисление;

2) для подготовки плоской поверхности использовался комплект полуавтоматического отрезного и шлифовально-полировального оборудования фирмы Struers (Германия).

Для определения изменения доли кремния использовался спектрометр ПАНУАС - 4ДИ. Спектрометр состоит из оптического блока со световодом и системой регистрации спектров, штатива с системой возбуждения спектра, а также автоматизированной системы управления на базе IBM-совместимого



компьютера. Проба, химический состав которой надо определить, устанавливается в штатив и выполняет функцию одного из электродов. Между пробой и подставным электродом при помощи источника возбуждения спектров возбуждается электрический разряд. В разряде происходит испарение и возбуждение свечения атомов пробы. В основу работы спектрометра положен метод эмиссионного спектрального анализа, использующий зависимость интенсивности спектральных линий от массовой доли элемента в пробе. Для определения изменения доли углерода использовался спектрометр МСА II.

### 3.3 Исследование свойств прототипа

В качестве прототипа в работе использовался порошок Stainless Steel Powder 316L, рекомендованный для использования в технологиях селективного лазерного спекания. Для определения требований, предъявляемых к порошкам, применяемым в технологиях селективного лазерного спекания, был проведен анализ некоторых параметров данного материала.

- Гранулометрический состав. Анализ гранулометрического состава металлического порошка Stainless Steel Powder 316L проводили с использованием микроскопа JSM-6400LV.

Анализ показал (рисунок 3.8), что основная масса материала имеет размер частиц в диапазоне 30-60 мкм. По-видимому, такой гранулометрический состав смеси обеспечивает необходимые показатели насыпной плотности порошка, а также пористости и качества поверхности изделия, полученного селективным лазерным спеканием.

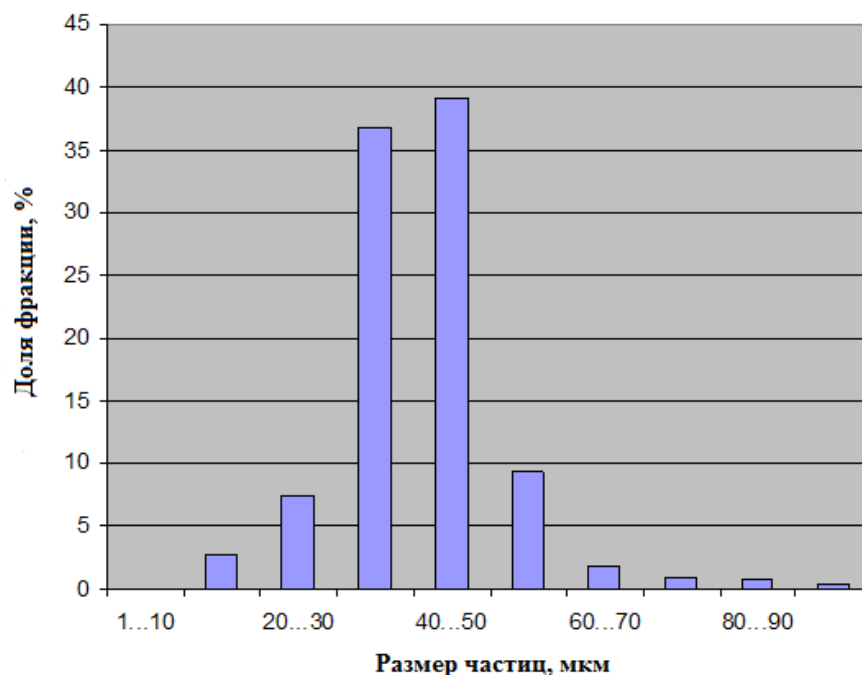


Рисунок 3.8. Гранулометрический состав порошка  
Stainless Steel Powder 316L

- Микropорошки, предназначенные для изготовления изделий селективным лазерным спеканием, должны обладать определенными величинами текучести и насыпной плотности, что позволит ускорить процесс нанесения каждого нового слоя и получения достаточной плотности укладки частиц для получения деталей с высокой плотностью.

Анализ текучести и насыпной плотности металлического порошка Stainless Steel Powder 316L, проведенные методом воронки, показали, что текучесть равняется приблизительно 12 с, а относительная насыпная плотность - около 0,53.

- Структура металла. Оценка структуры материала проводилась путем анализа микropорошка (рисунок 3.9) и шлифа (рисунок 3.10) микropорошка Stainless Steel Powder 316L (шлиф изготавливали с помощью комплекта полуавтоматического отрезного и шлифовально-полировального оборудования Struers) на растровом микроскопе JSM-6400LV.

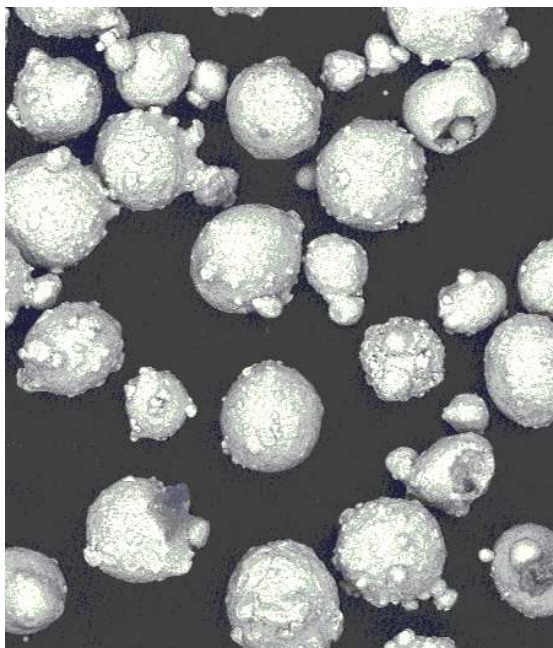


Рисунок 3.9. Фото металлического порошка Stainless Steel Powder 316L, полученное на растровом микроскопе JSM-6400LV

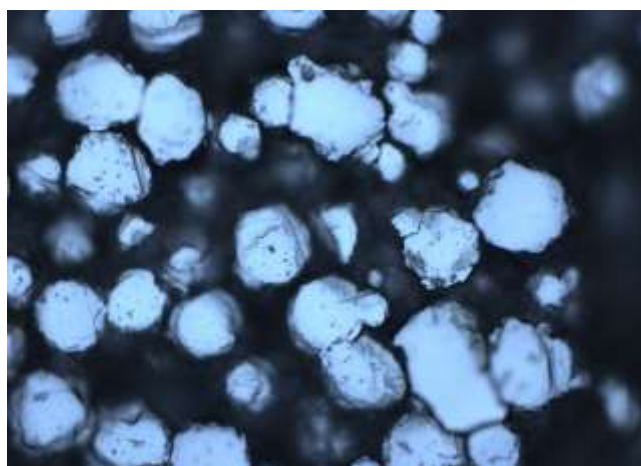


Рисунок 3.10. Шлиф порошка Stainless Steel Powder 316L, изготовленный на установке Struers TegraPol-15

Исследования показали, что содержание полых частиц в порошке Stainless Steel Powder 316L крайне мало. Такие требования к структуре частиц, по всей видимости, связаны с особенностями взаимодействия лазерного луча с дисперсными материалами, а также необходимостью обеспечения малой пористости детали, получаемой методом селективного лазерного спекания.

В главе 3 описана технологическая схема получения микропорошков распылением расплавов и оборудование, используемое в работе, приведена методика анализа микропорошков.

#### **4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА НА УРМ-001 НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУЧАЕМОГО МАТЕРИАЛА**

В данной главе приведены результаты анализа влияния различных параметров процесса распыления расплава в газовой струе на эффективность дробления и свойства получаемых материалов. Характеристики получаемого материала сравнивали с характеристиками прототипа, порошка, используемого в селективном лазерном спекании. Для этого было проведено исследование свойств прототипа.

##### **4.1 Перегрев жидкого металла**

Предварительные расчеты показали, что дробление расплава до капель необходимых размеров должно реализовываться даже при температурах жидкого металла, близких к температуре плавления. Несмотря на это проведение экспериментов на установке УРМ-001 предполагало предварительный нагрев расплава до температуры, на несколько десятков градусов превышающей температуру плавления металла. Необходимость перегрева расплава была обусловлена следующими факторами:

- необходимостью подготовки установки к распылению (снятие шлака, установка герметизирующей крышки), в ходе которой температура жидкого металла несколько понижалась;

- необходимостью предотвращения затвердевания жидкого металла вследствие остывания по мере движения по каналу подачи в распылительную форсунку.

Величина перегрева лимитировалась необходимостью добиться высоких показателей стойкости футеровки, энергоэффективности процесса, а также необходимостью предотвращения размягчения кварцевого канала подачи металла. Кроме того, поддержание высокого уровня расплава в печи, обусловленное необходимостью минимизировать объем герметичной рабочей полости в начальный момент распыления, приводило к брызгам расплава при

больших величинах перегрева выше ликвидуса.

Данные экспериментов (рисунки 4.1,4.2) свидетельствуют о том, что при повышении температуры перегрева расплава чугуна от 50 °С до 200 °С доля частиц диаметром менее 50 мкм увеличилась с 34,7% до 40,4%, при повышении температуры перегрева расплава меди от 70 °С до 270 °С – с 34,1% до 37,8%. Малое влияние нагрева меди, по-видимому, объясняется большей в сравнении с чугуном величиной теплоты кристаллизации меди, которая увеличивает вероятность дробления металла до необходимых размеров до момента затвердевания металла.

Таким образом, можно сделать вывод, что перегрев расплава чугуна перед распылением несколько повышает эффективность дробления струи металла, однако данный технологический прием сопряжен с существенным увеличением потребляемой электроэнергии. При распылении меди перегрев металла существенно не влияет на эффективность дробления.

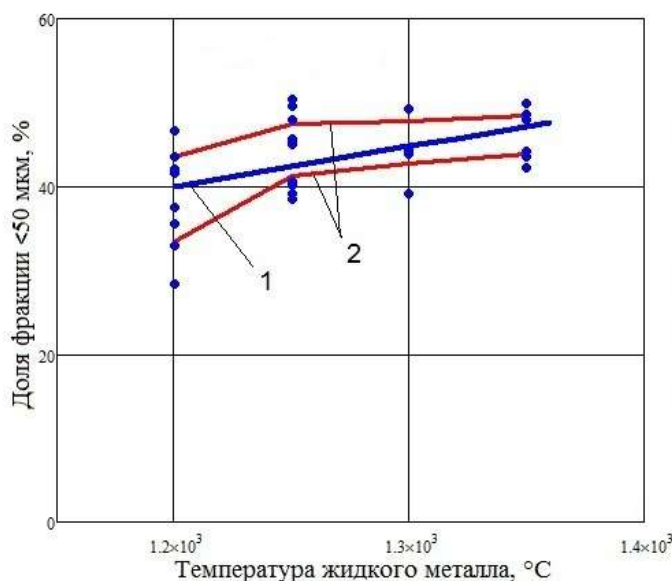


Рисунок 4.1. Зависимость доли фракции размером менее 50 мкм в общей массе порошка, полученного распылением жидкого чугуна в струе воздуха, от температуры: 1 – результаты эксперимента, 2 – границы доверительного интервала

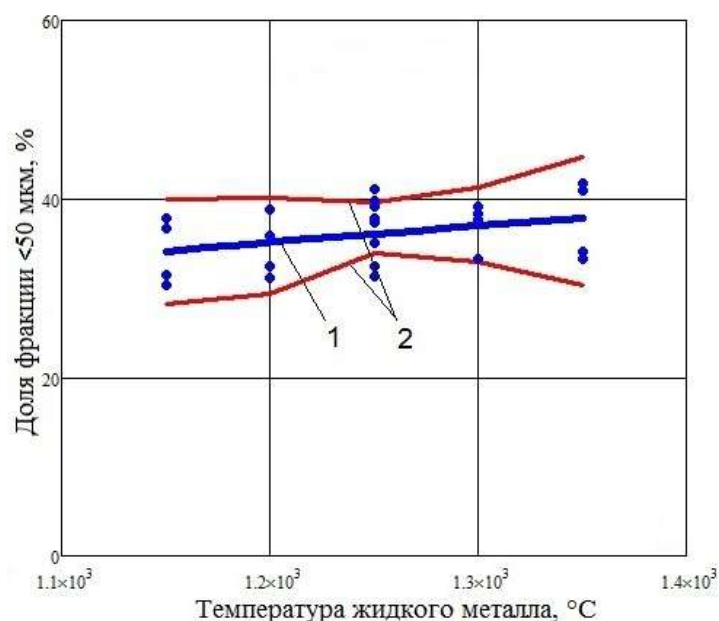


Рисунок 4.2. Зависимость доли фракции размером менее 50 мкм в общей массе порошка, полученного распылением жидкой меди в струе воздуха, от температуры: 1 – результаты эксперимента, 2 – границы доверительного интервала

Температура чугуна перед распылением слабо влияет на форму частиц получаемого материала (рисунок 4.3). Количественно это отражается на такой величине, как текучесть порошка. Так для фракции менее 50 мкм, текучесть порошка, полученного распылением чугуна при величинах перегрева 50°С и 200°С в среднем составила 26 с и 23 с соответственно. Отсюда можно сделать вывод о том, что форма частиц порошка, получаемого при распылении чугуна в струе воздуха, определяется в первую очередь не температурными условиями охлаждения капель, образующихся при дроблении струи расплава, а свойствами оксидов, образующихся на поверхности капли при химических реакциях компонентов сплава с кислородом воздуха.

Для порошков, полученных распылением меди в струе воздуха, перегрев расплава также слабо влияет на форму частиц получаемого порошка (рисунок 4.4). Так при величинах перегрева расплава на 50°С и 100°С выше температуры плавления текучесть порошка составила – 12 с и 10 с соответственно. Сферическая форма частиц в данном случае объясняется меньшей температурой плавления оксидов, образующихся на поверхности капель.



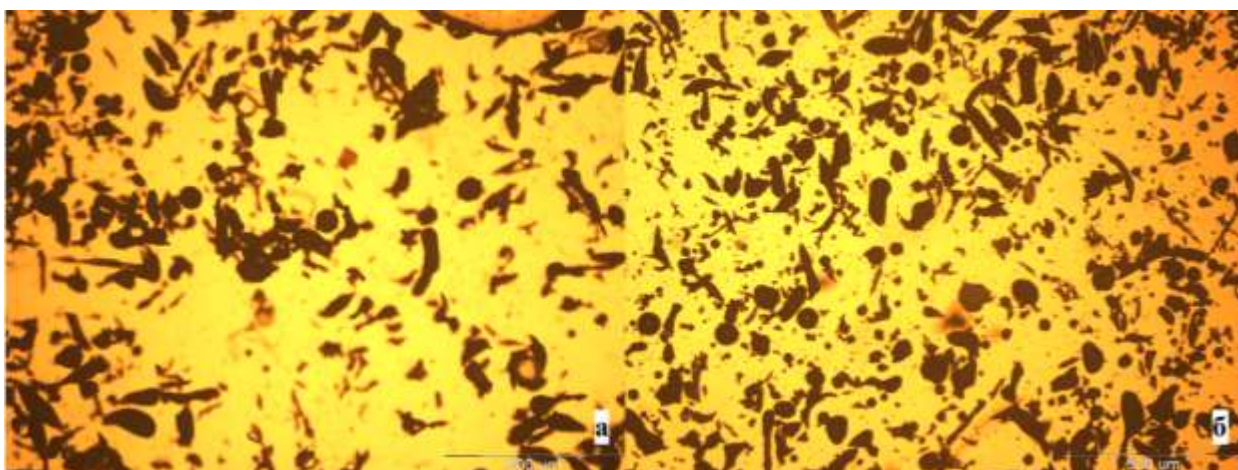


Рисунок 4.3. Металлический порошок, полученный распылением жидкого чугуна марки СЧ-15 в струе воздуха при перегреве 50°C (а) и 200°C (б)

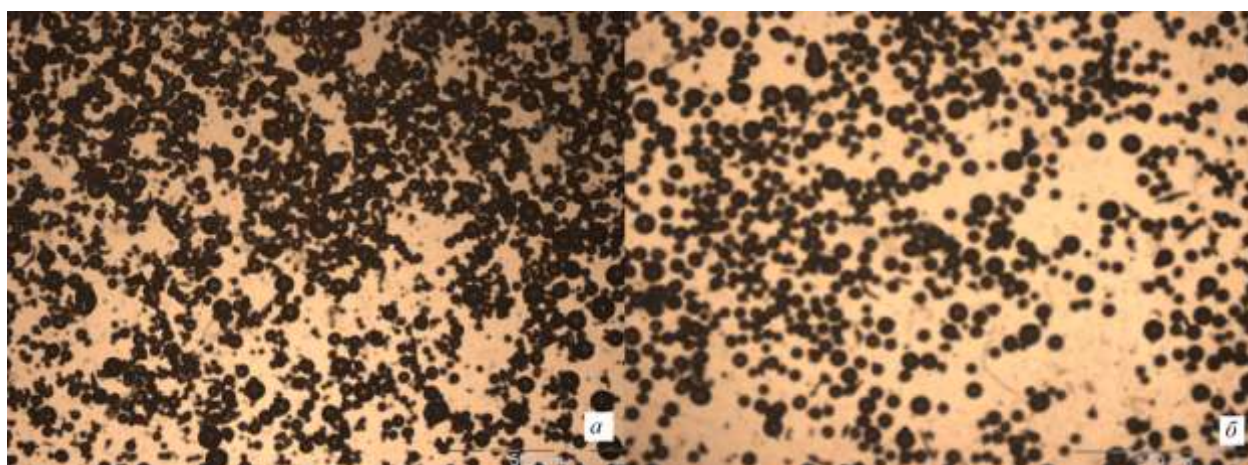


Рисунок 4.4. Металлический порошок, полученный распылением жидкой меди в струе воздуха при перегреве 70°C (а) и 270°C (б)

#### 4.2 Давление наддува рабочей полости

Одним из важных технологических параметров процесса, влияющих на гранулометрический состав порошка (рисунки 4.5, 4.6), является значение давления наддува герметичной рабочей полости печи. Как было показано выше, от давления наддува напрямую зависит скорость движения металла по каналу подачи в распылительную форсунку, а значит, при постоянном рабочем давлении – значение удельного расхода газа при распылении и эффективность дробления жидкой струи.

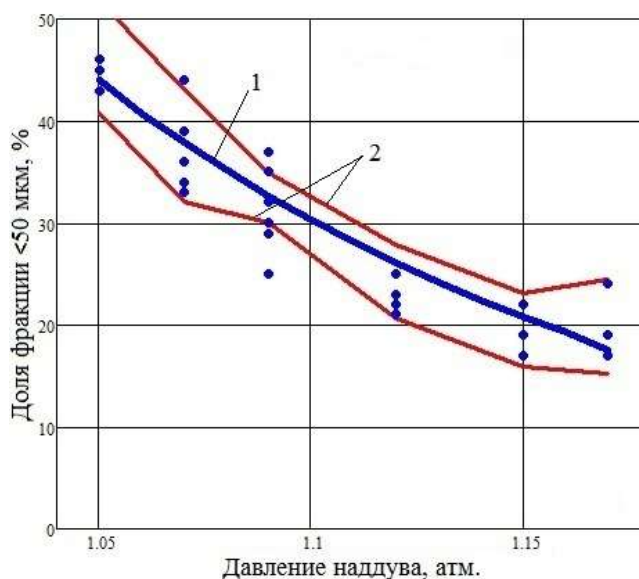


Рисунок 4.5. Зависимость доли фракции размером менее 50 мкм в общей массе порошка, полученного распылением жидкого чугуна в струе воздуха, от давления наддува: 1 – результаты эксперимента, 2 – границы доверительного интервала

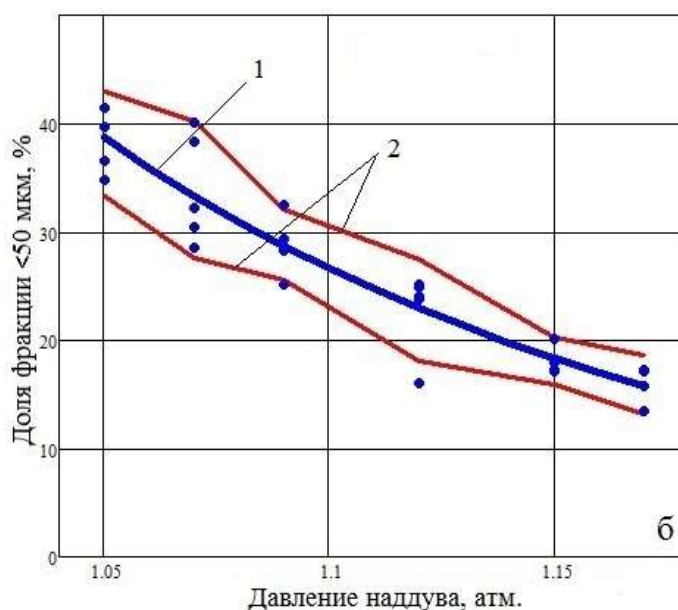


Рисунок 4.6. Зависимость доли фракции размером менее 50 мкм в общей массе порошка, полученного распылением жидкой меди в струе воздуха, от давления наддува: 1 – результаты эксперимента, 2 – границы доверительного интервала

Опыты показали, что повышение давления наддува герметичной рабочей полости печи, с одной стороны увеличивает расхода металла, а, следовательно, производительность процесса, с другой – ведет к укрупнению получаемого порошка, что связано уменьшением удельного расхода газа-распылителя.



Кроме того, следует учитывать, что минимальное значение скорости движения жидкости лимитируется необходимостью поддержания режима охлаждения, при котором не происходит застывание (рисунок 4.7) металла в канале.



Рисунок 4.7. Застывание меди в кварцевом канале

#### 4.3 Величина выхода канала подачи расплава за срез форсунки

Расчеты показали, что скорость газовой струи на выходе из форсунки резко меняется. Очевидно, что эффективность дробления жидкой струи зависит от координаты, в которой происходит контакт металла с газовой струей. Поэтому еще одним параметром процесса распыления расплава на установке УРМ-001 является величина выхода среза керамического канала подачи расплава за срез форсунки (рисунок 4.8).

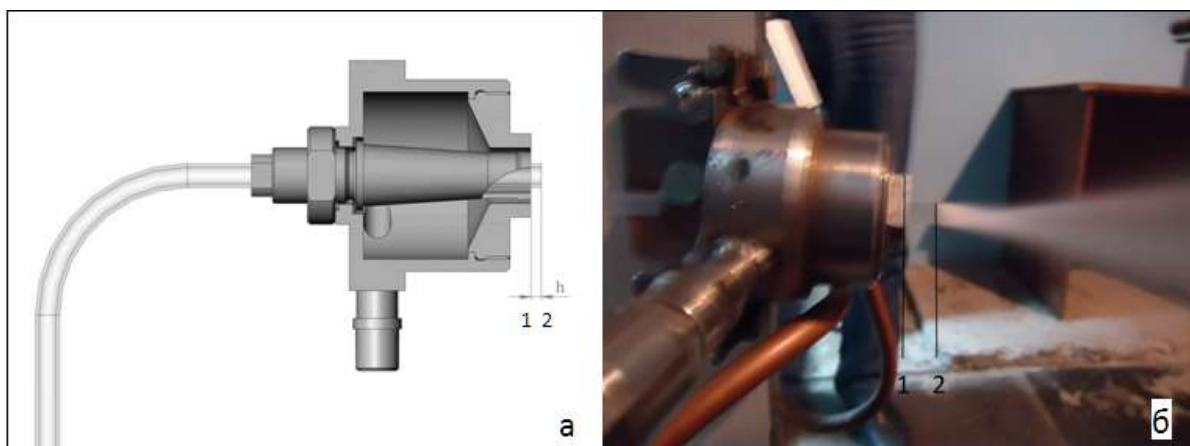


Рисунок 4.8. Расстояние между срезом форсунки (1) и срезом канала подачи расплава (2) на примере распыления воды: а – чертеж форсунки, б – форсунка

Результаты опытов показали, что увеличение расстояния между срезом канала подачи металла и срезом распыляющей форсунки уменьшает эффективность дробления струи металла. Так, при увеличении расстояния от 0 мм до 10 мм, в среднем, доля фракции размером менее 50 мкм при распылении чугуна в струе воздуха (рисунок 4.9) снизилась 65,7 % до 21,9%, при распылении меди (рисунок 4.10) – 58,1% до 20,6 %.

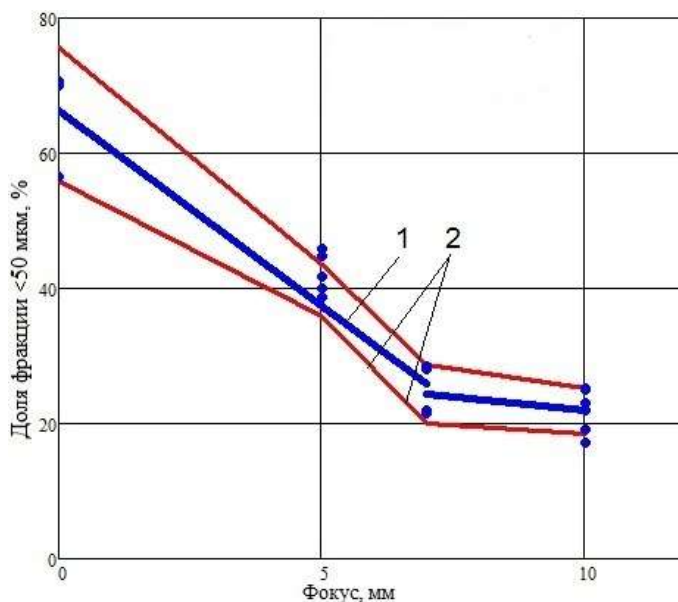


Рисунок 4.9. Зависимость доли фракции размером менее 50 мкм в общей массе порошка, полученного распылением жидкого чугуна в струе воздуха, от расстояния между срезом канала подачи металла и срезом форсунки: 1 – результаты эксперимента, 2 – границы доверительного интервала

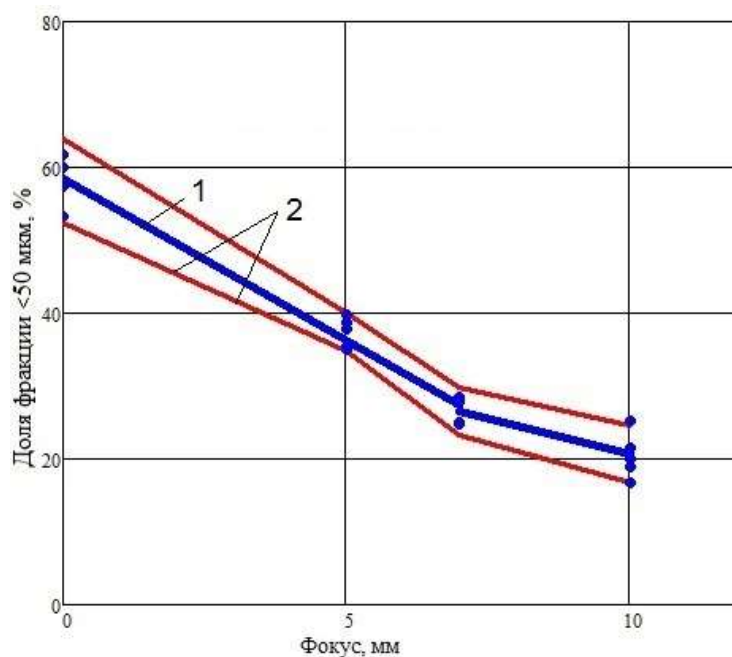


Рисунок 4.10. Зависимость доли фракции размером менее 50 мкм в общей массе порошка, полученного распылением жидкой меди в струе воздуха, от расстояния между срезом канала подачи металла и срезом форсунки: 1 – результаты эксперимента, 2 – границы доверительного интервала

Таким образом, по результатам экспериментов можно сделать вывод о целесообразности работы установки при нулевом расстоянии между срезом канала подачи металла и срезом форсунки. Однако добиться стабильного режима работы оборудования в таком режиме не удавалось, так как происходило застывание металла на выходе из канала подачи расплава (рисунок 4.11).



Рисунок 4.11. Застывание канала подачи жидкого металла

Эффект застывания металла на выходе из канала подачи объясняется движением металла вдоль стенок канала из-за образования области пониженного давления на срезе форсунки (рисунок 4.12).

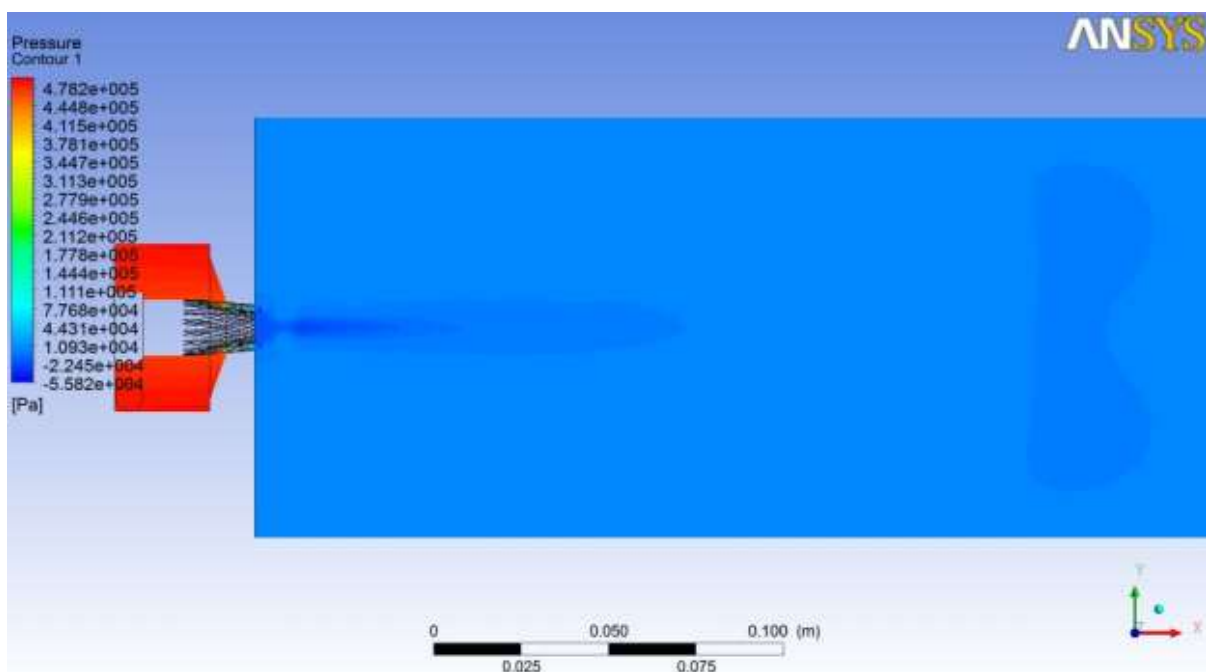


Рисунок 4.12. Давление газа в струе газа

По результатам физического моделирования процесса распыления (рисунок 4.13) был сделан вывод о целесообразности работы при расстоянии между срезом канала подачи металла и срезом форсунки не менее 5 мм.

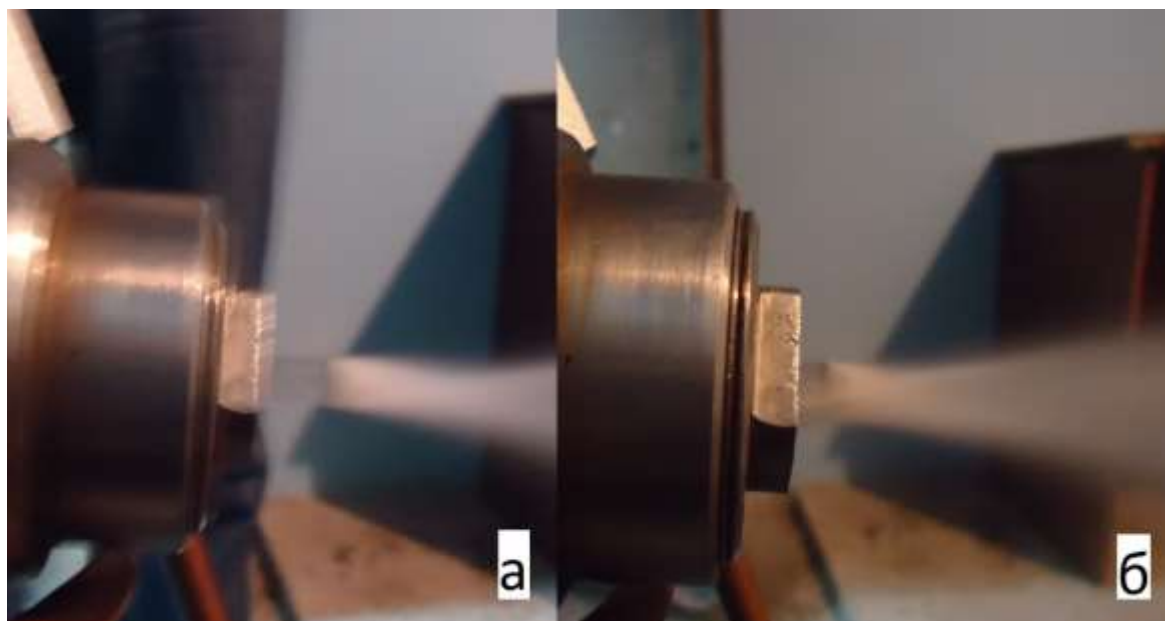


Рисунок 4.13. Движение жидкости при выходе из канала подачи расплава при расстоянии до среза форсунки 6 мм (а) и 3 мм (б)

В работе также проводилось моделирование процесса распыления жидкой меди в струе воздуха при температуре жидкости 1250 °С, давлении наддува рабочей полости плавильного агрегата 1,1 атм. и нулевом выходе канала подачи расплава за срез форсунки. Сравнение данных, полученных в результате компьютерного моделирования, с данными, полученными в результате эксперимента (рисунок 4.14), показало удовлетворительную сходимость.

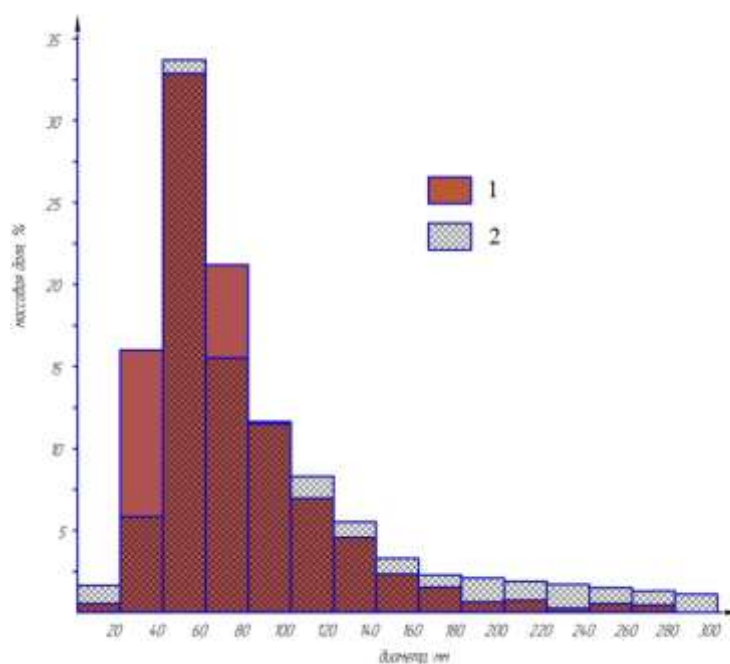


Рисунок 4.14. Гранулометрический состав материала: 1 - расчет, 2 – эксперимент

Гранулометрические составы порошков, полученных при различных режимах, представлены в Приложении 5.

#### 4.4 Геометрия форсунки

При проведении экспериментов использовали форсунки двух видов (рисунок 4.15), геометрия которых определяла различные расходы газов. Так средний расход распыляющего газа при использовании первого варианта форсунки составил 3 м<sup>3</sup>/мин., для второго варианта форсунки расход составил 2,5 м<sup>3</sup>/мин.



Рисунок 4.15. Фото распылительного узла: а – первый вариант форсунки, б – второй вариант форсунки

Опыты по распылению чугуна в струе воздуха показали, что среднее содержание фракции с размером частиц менее 50 мкм при использовании первого варианта форсунки составило 43,1% от общей массы, при использовании второй форсунки – 41,7 %.

Эффективное дробление при меньшем расходе распыляющего газа обусловлено меньшим расстоянием от выходных отверстий форсунки до канала подачи расплава. Таким образом, использование форсунки второго типа является предпочтительным при производстве микропорошка на установках с производительностью, схожей с производительностью УРМ-001, однако при увеличении производительности процесса, при увеличении сечения канала подачи расплава, необходимо будет использовать форсунку первого типа.

#### 4.5 Природа распыляющего газа

При использовании в качестве рабочего газа аргона некоторое увеличение мелкой фракции в общей массе порошка происходило в экспериментах по распылению чугуна. Очевидно, это объясняется тем, что основная часть капель чугуна дробится в струе аргона, до момента появления оксидной пленки при взаимодействии с кислородом воздуха. Таким образом, для значительной части капель увеличение вязкости расплава, препятствующей эффективному дроблению, происходит после дробления до требуемых размеров.

В случае распыления меди оксиды, образующиеся на поверхности капель, имеют температуру плавления, сопоставимую с температурой металла перед распылением, и, как следствие, слабо влияют на вязкость капли и эффективность дробления. Это объясняет малое изменение доли фракции менее 50 мкм в общей массе материала при использовании аргона в качестве распыляющего газа.

В работе были проведены исследования влияния природы распыляющего газа на форму и структуру частиц получаемого порошка.

Согласно расчетам, приведенным выше, отношения времени застывания капли металла к суммарному времени деформации капли при распылении чугуна и меди в струе воздуха, имеют величины, большие 1, что позволяет сделать вывод о выполнении условия, при котором в обоих случаях значительная часть частиц порошка будет иметь сферическую форму. Однако, данное предположение оказывается справедливым только при получении порошка распылением меди. Основная масса частиц порошка, полученного распылением расплава чугуна в струе воздуха, не обладает сферической формой. Объяснением этого также является то, что оксиды, образующиеся на поверхности капель меди имеют температуру плавления, сопоставимую с температурой металла, тогда как оксиды, образующиеся на поверхности капель чугуна (в первую очередь оксид кремния и оксиды железа), являются тугоплавкими соединениями. Образование же тугоплавких окислов на поверхности капли может не менять значение вязкости расплава внутри их объема, однако существенно увеличивает сопротивление капли деформирующим усилиям, что может быть в первом приближении эквивалентным повышению вязкости в двухфазной системе металл-оксид. А изменение вязкости жидкости, очевидно, влияет на процесс деформации капли.

На рисунках 4.16, 4.17 показаны порошки, полученные распылением меди и чугуна в струе различных газов. Форма частиц меди при использовании различных газов практически не меняется. Порошок, полученный распылением чугуна в струе аргона имеет в своем составе больше частиц с формой, близкой к сферической, чем порошок, полученный распылением чугуна в струе воздуха. Из



чего можно сделать вывод о том, что их деформация происходила в разных условиях.

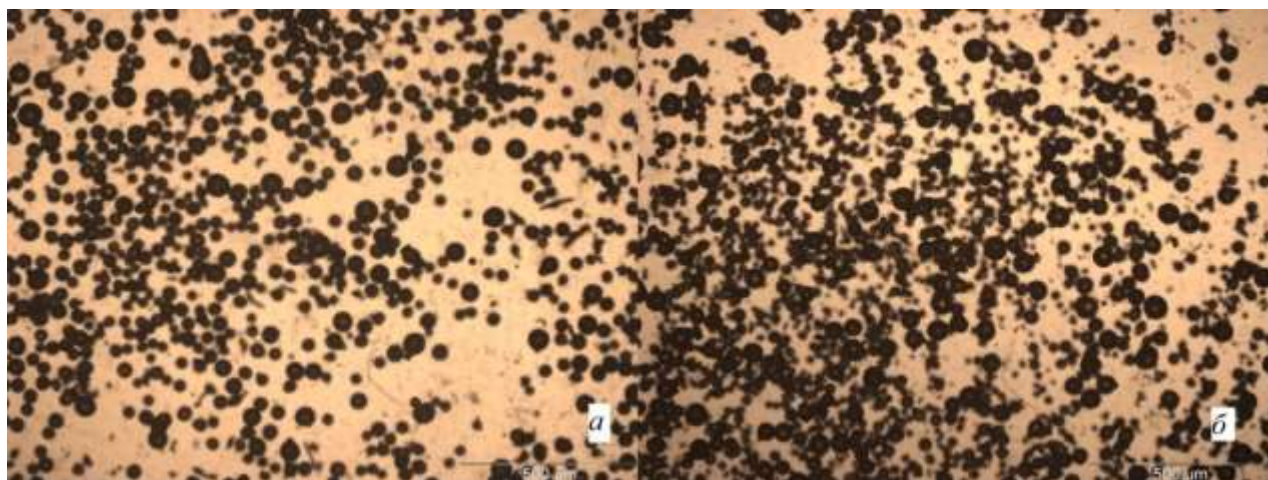


Рисунок 4.16. Фото металлического порошка, произведенного распылением расплава меди в струе воздуха (а) и аргона (б), полученное на микроскопе OLYMPUS 13X51

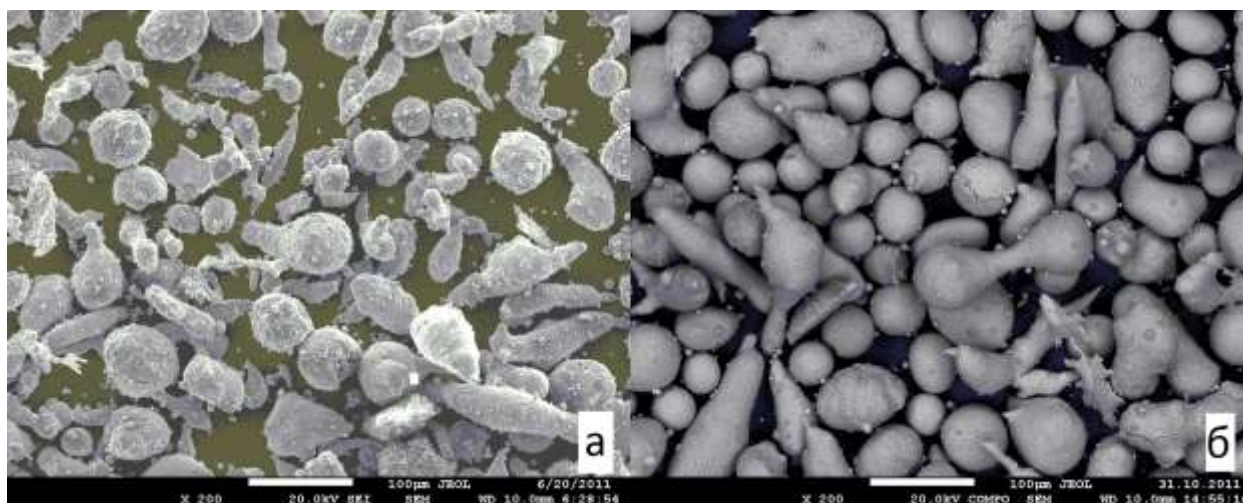


Рисунок 4.17. Фото металлического порошка, произведенного распылением расплава чугуна марки СЧ-15 воздухом (а) и аргоном (б), полученное на растровом микроскопе JSM-6400LV

Химическое картирование шлифов порошков показало, что поверхность частиц порошка, полученных распылением чугуна (рисунок 4.18) в струе воздуха, содержит большое количество кислорода.



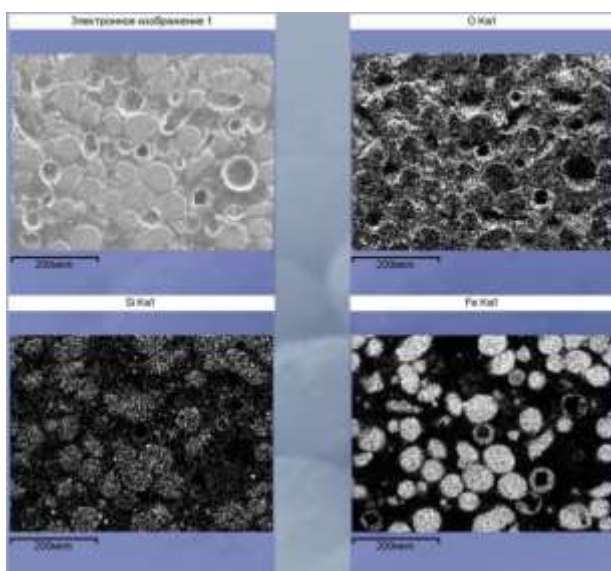


Рисунок 4.18. Фото результатов химического картирования шлифа металлического порошка, произведенного распылением расплава чугуна марки СЧ-15 воздухом, полученное на растровом микроскопе JSM-6400LV

Содержание кислорода в поверхностных слоях частиц порошка, полученного распылением чугуна в струе аргона (рисунок 4.19) гораздо меньше, что подтверждает гипотезу о причине различной формы частиц материалов.

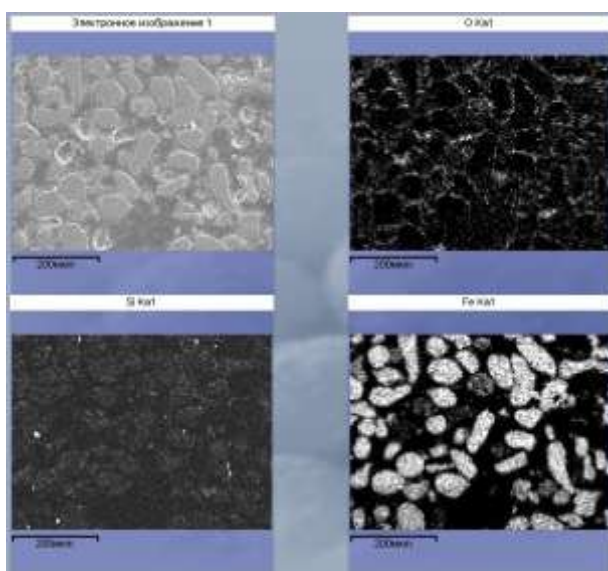


Рисунок 4.19. Фото результатов химического картирования шлифа металлического порошка, произведенного распылением расплава чугуна марки СЧ-15 аргоном, полученное на растровом микроскопе JSM-6400LV

Меньшее количество кислорода в поверхностных слоях порошка, полученного распылением меди (рисунок 4.20) в струе воздуха, очевидно, связано с большим сродством железа к кислороду при условиях распыления.

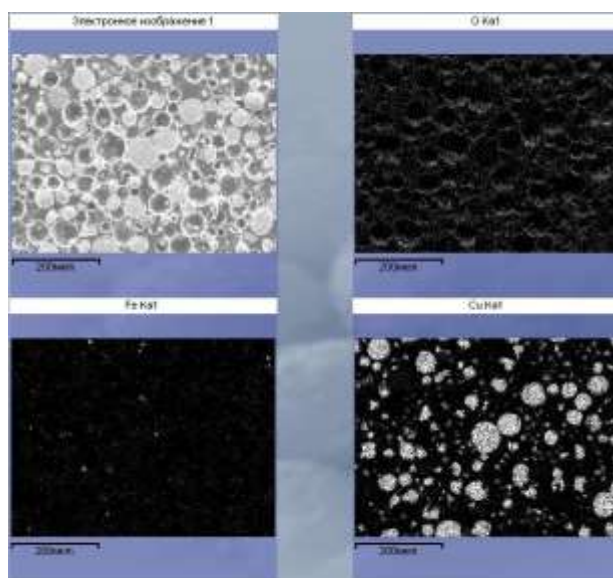


Рисунок 4.20. Фото результатов химического картирования шлифа металлического порошка, произведенного распылением расплава меди воздухом, полученное на растровом микроскопе JSM-6400LV

После качественной оценки формы частиц порошка была произведена количественная: с помощью анализа проекций частиц порошка (ГОСТ 25849-83) и оценкой текучести и насыпной плотности (ГОСТ 19440-94). Результаты анализа проекций представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Параметры формы частиц порошка

Материал	Газ-распылитель	$l_{\min}$ , мкм	$l_{\max}$ , мкм	$P^2/S$	$l_{\max}/l_{\min}$
Чугун	воздух	35,4	64,6	17,2	1,8
	аргон	37,2	63,2	16,8	1,7
Медь	воздух	38,1	47,1	15,3	1,2
	аргон	39,4	46,3	15,1	1,2
Stainless Steel Powder 316L	-	37,3	48,6	15,1	1,3

Анализ проекций порошков показал, что форма порошков, полученных распылением чугуна, значительно отличается от сферической. В то же время форма частиц, полученных распылением меди, по основным параметрам не уступает порошку Stainless Steel Powder 316L, рекомендованному для использования в установках лазерного спекания.

Измерения текучести и насыпной плотности (таблица 4.2) также показали соответствие медных порошков материалу, используемому в установках лазерного спекания.

Таблица 4.2. Значения текучести и насыпной плотности порошка

Распыляемый материал	Газ-распылитель	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Относительная насыпная плотность	Текучесть, с
Чугун	воздух	3150	0,45	26
	аргон	3330	0,48	18
Медь	воздух	5080	0,57	12
	аргон	5135	0,58	10
Stainless Steel Powder 316L	-	4170	0,53	12

#### 4.6 Изменение химического состава сплава при распылении в струе воздуха

В процессе распыления расплава площадь поверхности металла увеличивается на несколько порядков. Таким образом, создаются условия для взаимодействия металла с распыляющим газом. Очевидно, что при распылении расплава меди в струе воздуха или аргона значительного изменения химического состава материала не происходит, кроме того, окислы меди обычно легко восстанавливаются, что нельзя сказать о многокомпонентом расплаве чугуна.

Таким образом, в работе проводилась оценка изменения содержания в сплаве углерода и кремния – элементов, имеющих высокое сродство к кислороду, содержащемуся в воздухе. Содержание углерода и кремния в чугуне перед распылением составляло 3,6% и 2,2% соответственно.

Исследование химического состава порошка различных фракций показало зависимость содержания углерода в металле от размера частиц порошка. Максимум (рисунок 4.21) соответствует диапазону размеров частиц 80-100 мкм. Такая тенденция объясняется следующим образом: мелкие фракции (менее 100 мкм) имеют наибольшую поверхность, что объясняет интенсивное взаимодействие расплава с кислородом воздуха до момента застывания металла; более крупные фракции порошка (порядка 100 мкм) имеют меньшую поверхность, а, следовательно, окисление элементов происходит уже не так интенсивно; что касается крупных фракций, то при размерах капель расплава свыше 200 мкм на несколько порядков падает скорость охлаждения расплава, взаимодействие элементов расплава происходит уже не только на поверхности раздела фаз, но и в объеме металла, что приводит к большему угару элементов.

Максимальное содержание кремния (рисунок 4.22) также соответствует диапазону размеров частиц 80-100 мкм. Менее выраженное в сравнении с содержанием углерода уменьшение содержания кремния для фракций свыше 200 мкм, по-видимому, связано с видом протекающих реакций.

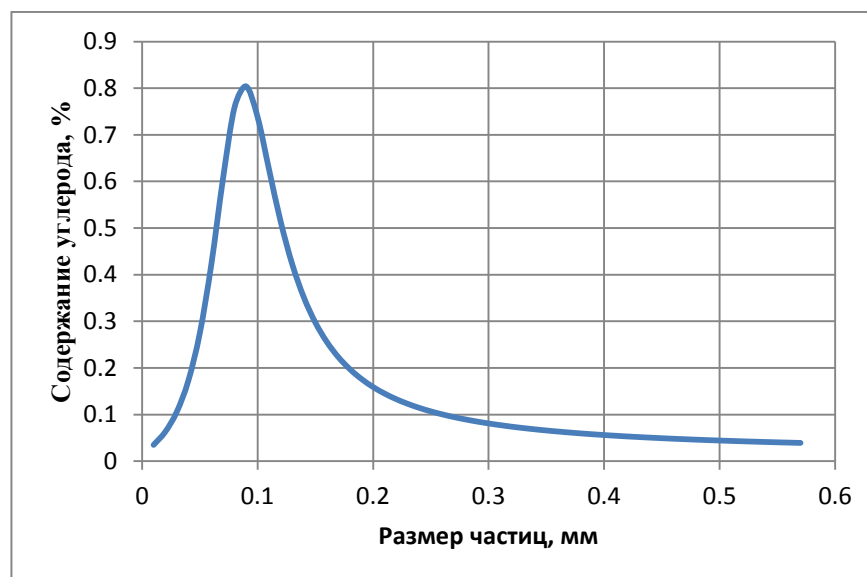


Рисунок 4.21. Зависимость содержания углерода в металле от размера фракции

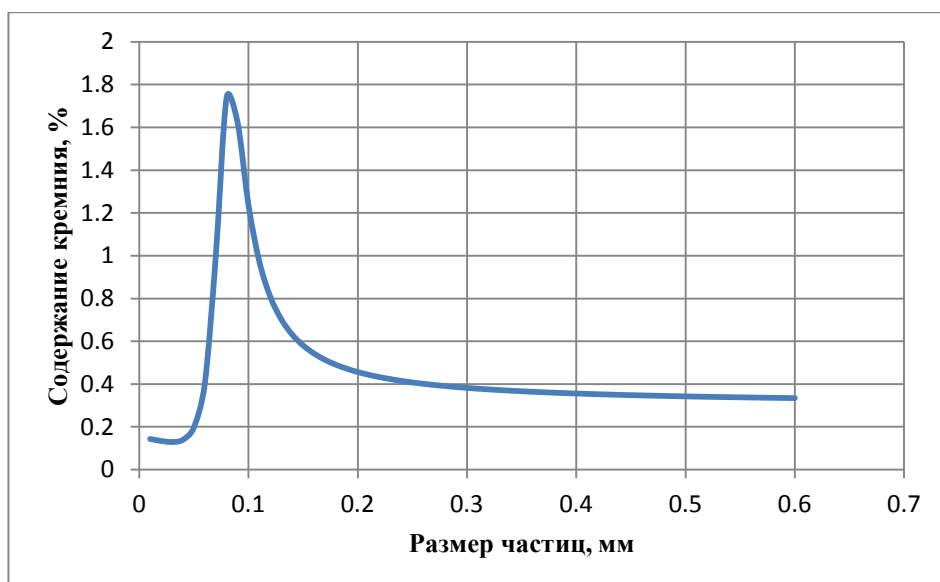


Рисунок 4.22. Зависимость содержания кремния в металле от размера фракции

Так окисление углерода протекает с образованием газообразных продуктов реакции, которые удаляются из зоны реакции. Таким образом, реакция окисления углерода происходит наиболее интенсивно, что объясняет больший угар углерода (рисунки 4.23,4.24) относительно первоначального содержания. В случае кремния газообразных продуктов реакции нет, а образующиеся оксиды из зоны реакции не удаляются, а остаются на поверхности капли, что затрудняет доступ кислорода.

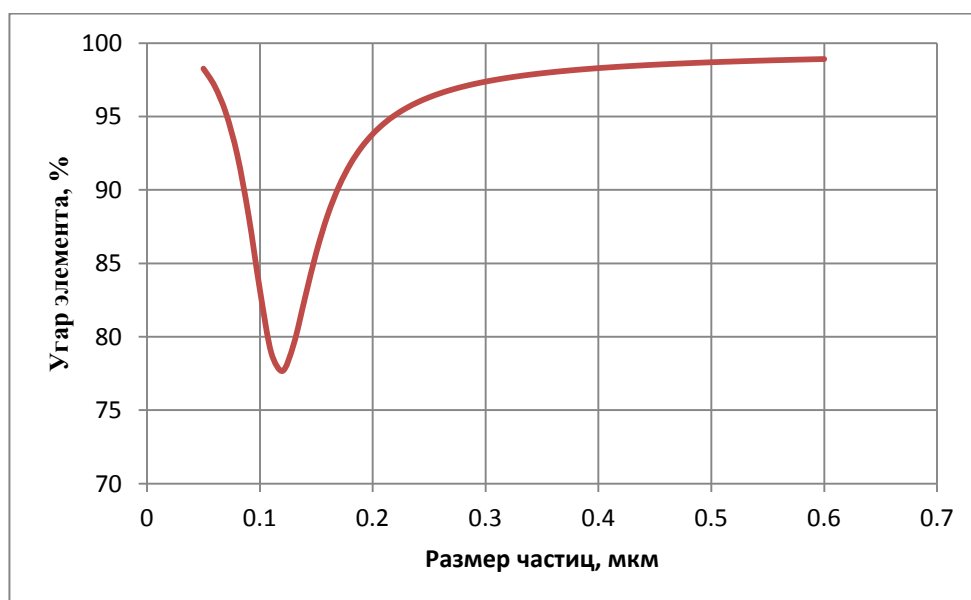


Рисунок 4.23. Зависимость угара углерода от размера фракции

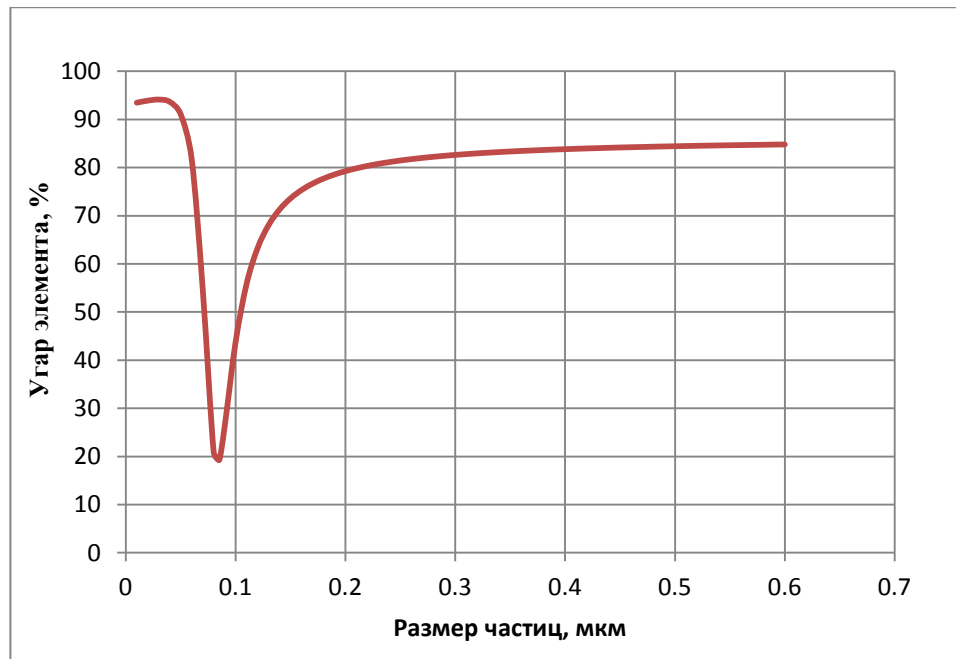


Рисунок 4.24. Зависимость угара кремния от размера фракции

#### 4.7 Структура материала

При остывании расплава в процессе диспергирования резко падает растворимость газов в металле. В процессе застывания газы, растворенные в металле, выходят из расплава. Это приводит к тому, что некоторая доля частиц, полученных распылением расплава меди, имеет внутренние полости (рисунок 4.25).

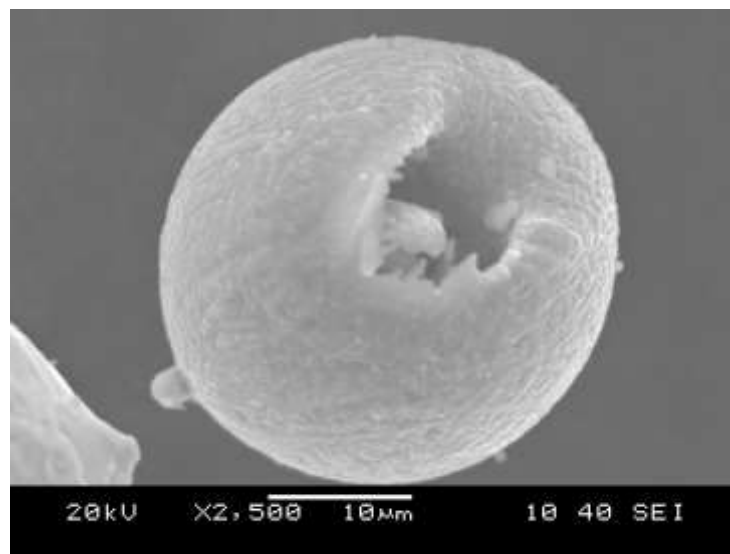


Рисунок 4.25. Фото частиц порошка, полученного при распылении меди в струе воздуха

При распылении чугуна, помимо выделения газов при остывании расплава, происходит окисление углерода с образованием двуокиси углерода, поэтому доля пустотелых частиц в порошке, полученном распылением чугуна (рисунок 4.26) выше, чем в порошке, полученном распылением меди.



Рисунок 4.26. Фото частиц порошка, полученного при распылении чугуна марки СЧ-15 в струе воздуха

Высокая скорость охлаждения капли и уменьшения растворимости газов проиллюстрирована на рисунке 4.26, здесь видно, что в общей массе порошка есть частицы, имеющие форму лопнувшего пузыря. Однако, исследования шлифов порошков и анализ, проведенный на микроскопе (рисунки 4.27, 4.28) показали, что основная масса частиц медного порошка и большая часть порошка, полученного распылением чугуна, имеют плотную структуру.

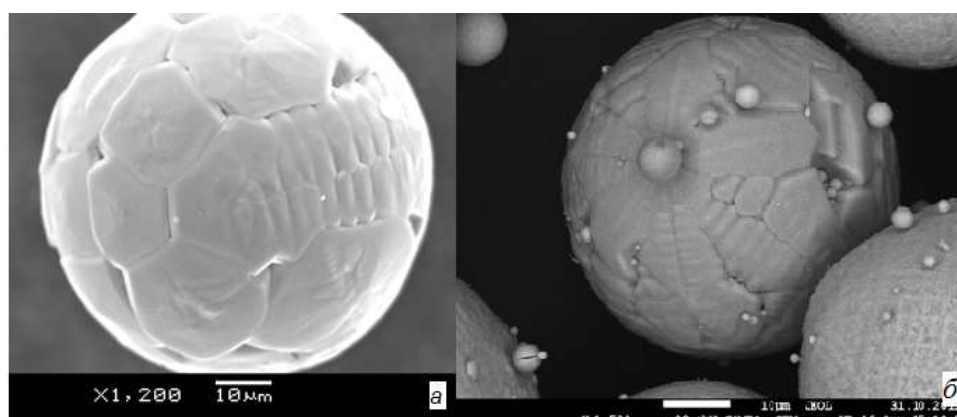


Рисунок 4.27 – Фото частицы порошка, полученного при распылении чугуна марки СЧ-15 в струе воздуха(а) и аргона(б)

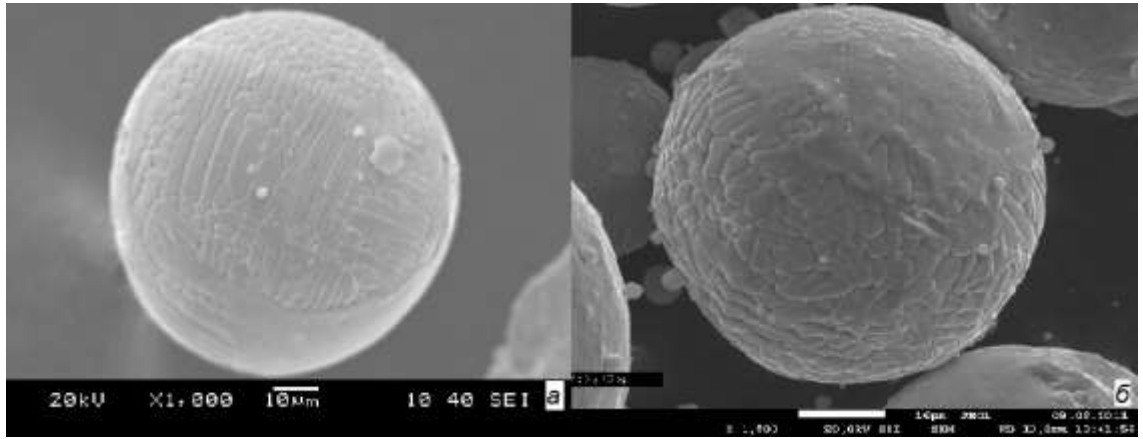


Рисунок 4.28. Фото частицы порошка, полученного при распылении меди в струе воздуха (а) и аргона(б)

На основе экспериментов были выведены следующие зависимости между основными параметрами процесса распыления металлов по схеме, предложенной в работе и эффективностью дробления металла:

– Зависимости доли (%) фракции размером менее 50 мкм в общей массе порошка, полученного распылением жидкого металла в струе воздуха, от температуры (°C) для чугуна (4.1) и меди (4.2)

$$y = 60,6 \ln(x) - 389,7; \quad (4.1)$$

$$y = 23,05 \ln(x) - 128,3; \quad (4.2)$$

– Зависимости доли (%) фракции размером менее 50 мкм в общей массе порошка, полученного распылением жидкого металла в струе воздуха, от давления наддува рабочей полости плавильного агрегата для чугуна (4.3) и меди (4.4)

$$y = 63,91 e^{-7,47x}; \quad (4.3)$$

$$y = 56,14 e^{-7,46x}; \quad (4.4)$$

– Зависимости доли (%) фракции размером менее 50 мкм в общей массе порошка, полученного распылением жидкого металла в струе воздуха, от расстояния между срезом канала подачи металла и срезом форсунки, для чугуна (4.5) и меди (4.6)

$$\begin{cases} y = -5,8x + 66 \rightarrow x \leq 7, \\ y = -8,8x + 30 \rightarrow x \geq 7, \end{cases} \quad (4.5)$$



$$\begin{cases} y = -4,4x + 58 \rightarrow x \leq 7 ; \\ y = -2x + 40 \rightarrow x \geq 7 \end{cases} ; \quad (4.6)$$

Данные зависимости, а также методика выбора параметров процесса диспергирования, предложенная в работе, могут быть использованы при выборе режимов работы установок распыления металлов на тех предприятиях, где используется схема принудительной подачи жидкого металла в распылительную форсунку.

## Заключение

В результате проведенного исследования решена актуальная научная задача и получены следующие основные результаты:

1. Разработана новая методика расчета диаграмм технологических режимов распыления жидких высокотемпературных сред для получения порошков с заданными характеристиками.

2. Разработана новый технологический комплекс по получению металлических микропорошков, основанный на схеме с принудительной подачей жидкого металла в распылительную форсунку.

3. Установлены новые зависимости между величиной давления наддува рабочей полости плавильного агрегата, величиной перегрева распыляемой жидкости, геометрическими параметрами распыляющего узла и эффективностью дробления жидкости.

На основе зависимостей, полученных в ходе эксперимента, с учетом возможностей оборудования, а также с учетом условий работы используемых огнеупорных материалов и поддержания стабильного процесса распыления жидкого металла, были выбраны следующие технологические режимы:

1) Распыление чугуна в струе воздуха:

- давление наддува 1,05 атм.;
- температура жидкого металла к началу процесса распыления 1250 °С;
- расстояние между срезом канала подачи металла и срезом форсунки 5 мм.

2) Распыление меди в струе воздуха:

- давление наддува 1,05 атм.;
- температура жидкого металла к началу процесса распыления 1200 °С;
- расстояние между срезом канала подачи металла и срезом форсунки 5 мм.

Результаты работы могут быть использованы на предприятиях отрасли порошковой металлургии, а разработанный технологический комплекс – на предприятиях высокотехнологичных секторов экономики, технологическая

цепочка которых включает получение изделий методом селективного лазерного спекания металлических порошков.

Продолжением исследований, проводимых в работе, стала разработка схемы распыления металлических расплавов, включающая бесконтактное плавление металла (№133445 от 20.10.2013), и создание установки получения металлических порошков (Приложение Е).

Технические решения, реализованные при создании УРМ-002:

- специальная форма индуктора, обуславливающая узкую зону плавления заготовки, принцип бесконтактного плавления и возможность использования инертной атмосферы позволяет получать порошки тугоплавких и активных металлов;

- распыляющая форсунка, выполненная в виде разомкнутого контура, располагается в непосредственной близости от индуктора, что исключает охлаждение жидкого металла по мере движения к форсунке;

- принцип зонного плавления обеспечивает мгновенное начало и окончание процесса;

- возможность изменения скорости диспергирующей струи и массового расхода металла обеспечивает регулирование дисперсности получаемого материала

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ANSYS CFX-Solver Theory Guide: Release 13.0 // ANSYS, Inc. – 2010. –390 р.
2. Соу, С. Гидродинамика многофазных систем / С. Соу. – М.: Мир, 1971. – 578 с.
3. Dowson, A. G. Recent development in powder metallurgy/ A. G. Dowson// Metall and Metall-form.–1974, 41.– N 6.– P. 132-148.
4. Gebhart E., Kostlin K.– Z. Metallk.–1957.– 636 p.
5. Gordon, G. Механизм и скорость разрушения капель / G. Gordon // J. Appl. Phys. – 1959. – №11. – P. 21-25.
6. Kim, J. Selective laser sintering characteristics of nylon 6/clay-reinforced nanocomposite / J. Kim, T.S. Creasy // Polymer Testing. – 2004. – Vol. 23, № 6. – P. 629-636.
7. Kohnisch Mn Production of copper all on rowders by atomization ene worstoff dyrch pulver metailyrgi sche vertahren, Berlin, (1964), 9, ser. A., 64.
8. Lu, H. Correlation of spray ring data for gas atomisation of Liquid Metals / H. Lu // J. Metals. – 1970. – № 20. – P. 45-50.
9. Pelzel E. – Metall, 1935, N 3'4. Цит. по 12.
10. Schulmann, H. Rontgenuntersuchungen schmelzflussiger Metalle und Legierungen III uber die systeme K-Hg und Na-Hg-Z/ H. Schulmann// anorg Chem.– 1962.– P.204-225.
11. The synthesis of a biocomposite based on nickel titanium and hydroxyapatite under selective laser sintering conditions / I.V. Shishkovsky, E.Y. Tarasova, L.V. Zhuravel', A.L. Petrov // Technical Physics Letters. – 2001. – Vol. 27, № 3. – P. 211-213.
12. Tomotika S.– Proc. Roy. Soc, 1935, 130. Цит. по 38.
13. Toye T.C., Jones E. R. – Proc. Phys. Soc.– 1958.– P.71-88.

14. Wahrscheinliche Werte der Viskosita von schmelzflussigen Zinn, Blei, Wismut, Kalium/ Budde I., Fischer K., Menz W., Saurwald F. //Z. phys. Chem.– 1961.– S. 100-107.
15. Андронов, В.Н. Жидкие металлы и шлаки: справочник / В.Н. Андронов, Б.В. Чекин, С.В. Нестеренко. – М.: Metallurgiya, 1977. – 128с.
16. Блинов, В.И. О дисперсности механически распыленной воды / В.И. Блинов // М. : ВТТГ 1931.– 127 с.
17. Блинов, В.И. О пульсации струи и разрыве ее на капли / В.И. Блинов, Е.Л. Фейнберг// Журн. техн. физики. – 1933.– №5.– с. 712-728.
18. Бойцов Б.В. Повышение качества подготовки производства применением технологий быстрого прототипирования / Б.В. Бойцов, М.Ю. Куприков, Ю.В. Маслов // Труды МАИ. – 2011. – №49. – С.6.
19. Бухман, С.В. Определение критерия дробления / С.В. Бухман // Вести АН КазССР. – 1954. – № 80. – С.11-15.
20. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 721 с.
21. Васильев, Ф.В. Снижение себестоимости изделий для авиационно-космической техники, изготавливаемых методами послойного синтеза / Ф.В. Васильев // Труды МАИ. – 2011. – №49. – С.79.
22. Вебер, Д. Распад струи жидкости / Д. Вебер // В кн.: Двигатели внутреннего сгорания. М. : ОНТИ, Ш36. – Т. 1, с. 23-27.
23. Витман, Л. А. Распыливание жидкости форсунками/ Л.А. Витман, Б.Д. Канцельсон, И.И. Палеев// М.; Л. : Госэнергоиздат.– 1962.– 264 с.
24. Витман, Л.А. Распыливание вязкой жидкости форсунками/ Л.А. Витман// Сборник трудов Ленинградского института механизации сельского хозяйства. – 1953.– с. 21-29.
25. Волинский, М.С. О дроблении капель жидкости в потоке воздуха / Волинский, М.С. – М.: ЦАГИ, 1948. – 9 с.
26. Глинков, М.А. Основы общей теории печей/ М.А. Глинков //М.: Metallurgizdat.–1962.– с. 356-357.

27. Горбис, З.Р. Теплообмен дисперсных сквозных потоков/ З.Р. Горбис// М.; Л. : Энергия.– 1964.–296 с.
28. Грацианов, Ю. А. Металлические порошки из расплавов/ Ю.А. Грацианов, В. В. Путимцев, А.Ф. Силаев // М. : Metallurgia, 1970.– 245 с.
29. Грацианов, Ю. А. Получение специальных сплавов для постоянных магнитов/ Ю.А. Грацианов, А.А. Герасименко// Передовой науч.-техн. опыт ГОСИНТИ.– 1963.– № 15.– с. 3-20.
30. Грацианов, Ю.А. Исследование магнитных свойств металло-керамических постоянных магнитов из порошков сплавов системы железо-никель-алюминий/ Ю.А. Грацианов, Б.И. Путимцев // В кн.: Всесоюз. совет по литым сплавам для постоян. магнитов.– Саратов: Коммунист, 1964.– с.154-168.
31. Забродский, С.С. Гидродинамика и теплообмен в псевдосжиженном слое / С.С. Забродский // М.: Госэнергоиздат, 1963. – 488 с.
32. Кацнельсон, Б.Д. Исследование конвективного теплообмена между частицами и потоком в нестационарных условиях/ Б.Д. Кацнельсон, Ф.А. Тимофеева// Тр. ЦКТИ, кн. 12, 1949.
33. Кипарисов, С.С. Порошковая металлургия / С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. – М.: Metallurgia, 1980. – 496 с.
34. Ключингер, О. Процесс впрыскивания в бескомпрессорных двигателях/ О. Ключингер //В кн.: Двигатели внутреннего сгорания.– М.: ОНТИ.– 1936.– с. 169-172.
35. Клячко, Л.А. К теории дробления капли потоком газа / Л.А. Клячко // Инженерный журнал. – 1963. – Т.3, №3 – С. 554-557.
36. Клячко, Л.А. Коэффициент конвективного тепло-влагообмена в газодисперсной системе / Л.А. Клячко // Журнал технической физики. – 1945. – № 8. – С.580-584.
37. Клячко, Л.А. Теплообмен в дисперсных системах / Л.А. Клячко // Отопление и вентиляция. – 1964. – № 4. – С.27-32.

38. Кудряшов, Л. И. Обобщение гидродинамической теории теплообмена на случай обтекания тел с отрывом/ Л.И. Кудряшов// Изв. АН СССР. Отд-ние техн. наук.–1953.– № 9.– с.1309-1316.
39. Кутателадзе, С.С. Гидравлика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. – М.: ГЭИ, 1958. – 382 с.
40. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 904 с.
41. Лыков, А.В. Теория теплопроводности/ А.В. Лыков// М.: Высшая школа.– 1967.–599 с.
42. Лышевский, А. С. К определению силы сопротивления жидких капель / А.С. Лышевский// Тр. Новочеркас. политех. ин-та.– 1966, 160.– с.12-16.
43. Лышевский, А.С. Неустойчивость и распад круглой струи вязкой жидкости, окруженной невязкой жидкостью / А.С. Лышевский // Труды Новочеркасского политехнического института. – 1958. – С. 36-42.
44. Лышевский, А.С. О влиянии турбулентности на распад жидкой струи / А.С. Лышевский // Труды Новочеркасского политехнического института. – 1957. – 39. – С. 81—86.
45. Лышевский, А.С. О критерии распада жидких капель / А.С. Лышевский // Труды Новочеркасского политехнического института. – 1959. – 86. – С. 71—86.
46. Лышевский, А.С. Процессы распыливания топлива дизельными форсунками. – М.: Машгиз, 1963. – 179 с.
47. Ляховский, Д.Н. Конвективный теплообмен сферических взвешенных частиц с окружающей средой/ Д.Н. Ляховский// Котлотурбиностроение.– 1947.– с. 29-31.
48. Маслов, Ю.В. Быстрое прототипирование и его применение в аэрокосмической отрасли / Ю.В. Маслов, В.Ю. Мищенко // Атмосферные энергетические установки. – 2011. – №1. – С.23-27.
49. Метод непосредственного наблюдения пор пористых материалов / Т.Е. Головкина, Л.Н. Давыдова, Н.А. Игнатъев и др. // Порошковая металлургия. – 1972. – №8. – С.77.

50. Найда, Ю.И. Распыление бронзы и свойства получаемых порошков / Ю.И. Найда, О.С. Ничипоренко // Порошковая металлургия. – 1967. – № 7. – С. 23-25.

51. Ничипоренко, О. С. Роль вязкости расплава в формировании частиц порошка при распылении / О.С. Ничипоренко // Порошковая металлургия. – 1968. – №12. – С.1-6.

52. Ничипоренко, О.С. Исследование формообразования капель металла при распылении / О.С. Ничипоренко, Ю.И. Найда, А.Б. Медведовский // Порошковая металлургия. – 1972. – № 12. – С.64-68.

53. Ничипоренко, О.С. О теплообмене между частицами металла и газом/ О.С. Ничипоренко, Ю.И. Найда // Порошковая металлургия.– 1968.– № 7.– с.3-5.

54. Ничипоренко, О.С. Получение никелевого порошка распылением / О.С. Ничипоренко, Ю.И. Найда, А.В. Кочергин // Порошковая металлургия. 1970. – № 12. – С. 16.

55. Ничипоренко, О.С. Распыленные металлические порошки/ О.С. Ничипоренко, Ю.И. Найда, А.Б. Медведовский// Киев: Наук. Думка, 1980. – 240 с.

56. Ничипоренко, О.С. Формообразование частиц порошка при распылении / О.С. Ничипоренко, Ю.И. Найда // Порошковая металлургия. – 1968. – № 10. – С.1-5.

57. Павловская, Е. И. Получение порошков металлов со сферической формой частиц на металлизационном аппарате/ Е.И. Павловская, М.Б. Лев, Б.А. Баркан // Порошковая металлургия.– 1963.–№ 6.– с. 99-105.

58. Патент 2017588 Российская Федерация, МПК<sup>5</sup> В 22 F 9/08. Устройство для получения металлических порошков / Е.Л. Муравьева, А.В. Орехов. – № 4912556/02; заявл. 20.02.1991; опубл. 15.08.1994, Бюл. №23. – 3 с.

59. Патент 2038924 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 22 F 9/08. Установка для получения гранул центробежным распылением расплава / Е.П. Мошин, В.В. Миклин, В.И. Николаев, М.В. Чувашов. – № 5067208/02; заявл. 03.08.1992; опубл. 09.07.1995, Бюл. №19. – 4 с.



60. Патент 2068319 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> В 22 F 9/08. Устройство для получения металлических порошков / С.Д. Розанов, С.В. Бяков, В.А. Новиков. – № 92012945/02; заявл. 21.12.1992; опубл. 27.10.1996, Бюл. №30. – 4 с.

61. Патент 2111834 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> В 22 F 9/08. Устройство для получения металлического порошка распылением расплава / И.И. Митин, В.И. Митин. – № 95118095/02; заявл. 20.10.1995; опубл. 27.05.1998, Бюл. №15.– 4 с.

62. Патент 2158659 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 22 F 9/08. Установка для получения порошков алюминия, магния и их сплавов / А.И. Галанов, В.Г. Гопиенко, В.К. Щербаков и др. – № 99118283/02; заявл. 12.08.1999; опубл. 10.11.2000, Бюл.№31. – 4 с.

63. Патент 2171160 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 22 F 9/10. Способ центробежного распыления металла и устройство для его осуществления / А.В. Полетаев, И.В. Анисимов. – № 99127172/02; заявл. 28.12.1999; опубл. 27.07.2001, Бюл. №21.– 4 с.

64. Патент 2173609 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 22 F 9/08. Способ получения порошков высокореакционных металлов и сплавов и устройство для его осуществления / Н.Ф. Аношкин, А.Ф. Егоров, В.Т. Мусиенко, А.В. Александров. – № 2000114228/02; заявл. 07.06.2000; опубл. 20.09.2001, Бюл.№26. – 4 с.

65. Патент 2191660 Российская Федерация МПК<sup>7</sup> В 22 F 9/08. Установка для получения металлических гранул / С.В. Бутаков, И.С. Ольков. – № 2001101199/02; заявл. 12.01.2001; опубл. 27.10.2002, Бюл. №30.– 4 с.

66. Патент 2222412 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 22 F 9/06. Установка для распыления жидкого металла / Л.В. Курочкин, А.Н. Анисимов. – № 2001132195/02; заявл. 28.11.2001; опубл. 27.01.2004, Бюл. №3.– 4 с.

67. Патент 2229363 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> В 22 F 9/10. Способ получения металлического порошка распылением / Н.В. Чесноков, А.А. Обухович, И.Н. Андрианов и др. – № 2002114298/02; заявл. 31.05.2002; опубл. 27.05.2004, Бюл.№15. – 3 с.

68. Патент 2229960 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 22 F 9/08. Установка для получения металлических порошков распылением расплавов / В.Г. Гопиенко, В.П. Черепанов, А.И. Галанов и др. – № 2002123682/02; заявл. 05.09.2002; опубл. 10.06.2004, Бюл.№19. – 4 с.

69. Патент 2296648 Российская Федерация МПК В 22 F 9/08. Форсунка для распыления расплавленных металлов / А.В. Кукса, А.В. Мольков, А.В. Губанов. – № 2005132356/02; заявл. 19.10.2005; опубл. 10.04.2007, Бюл. №10. – 3 с.

70. Патент 2058853 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> В 22 F 9/10, В 22 F 9/06. Блок-распылитель для центробежного распыления металлического расплава / Т.Т. Кондратенко, С.П. Герасимов, М.В. Пикунов. – № 93021509/02; заявл. 23.04.1993; опубл. 27.04.1996, Бюл. №12. – 3 с.

71. Петрдлик, М. Загрязнения и примеси в спеченных материалах/ М. Пердлик// М. : Металлургия, 1971.– 176 с.

72. Попов, В.К. Лазерные технологии быстрого прототипирования для изготовления индивидуальных имплантов и матриц для тканевой инженерии / В.К. Попов, Е.Н. Антонов, В.Н. Баграташвили и др. // Альманах клинической медицины. – 2006. – №12. – С.127-127.

73. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учебник для вузов / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др.; под ред. Б.С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.

74. Прандтль, Л. Гидроаэродинамика / Л. Прандтль – М.: Изд-во иностр. лит., 1951. – 576 с.

75. Прототипирование и технология послойного синтеза в современном компьютеризированном производстве / О.С. Сироткин, Ю.М. Тарасов, С.Б. Рыцев, Р.И. Гирш // Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение. М.: ОАО «НИЦ АСК», 2008. – 608 с.

76. Путимцев, Б.И. Влияние теплофизических свойств газов и металлических расплавов на свойства распыленных порошков / Б.И. Путимцев // Порошковая металлургия. – 1967. – № 3. – С.1-7.

77. Путимцев, Б.И. Условия изготовления и свойства распыленных порошков железа и его сплавов / Б.И. Путимцев // Порошковая металлургия. – 1968. – № 11. – С. 1-7.
78. Распыление жидкостей/ В.А. Бородин, Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, В.И. Ягодкин // М. : Машиностроение, 1967.– 322 с.
79. Релей, Д. В. Теория звука / Д. В. Релей // М. : ОГИЗ, 1944. – Т. 2. 395 с.
80. Рунов, М.А. Изучение процесса дробления ферросилиция: автореф. дис. на соиск. степ. канд. техн. наук / М.А. Рунов. – Кемерово, 1969 – 25 с.
81. Силаев, А.Ф. О влиянии перегрева металлических расплавов при распылении газовым потоком на дисперсность и структуру порошка / А.Ф. Силаев. – Запорожье, 1965.-44 с.
82. Сыромятников, Н.И. Тепловые процессы в печах с кипящим слоем/ Н.И. Сыромятников, Г.К. Рубцов // М.: Металлургия, 1968.– 116 с.
83. Треш, А. К закону распределения капель по размерам при распылении / А. Треш, Л. Гроссман // Вопросы ракет, техники. – 1954. – № 4. – С. 78-82.
84. Треш, А. Распыливание жидкости / А. Треш // Вопросы ракет техники. – 1955. – № 4. – С.28-32.
85. Уббелоде, А. Плавление и кристаллическая структура/ А. Уббелоде // М.: Мир.– 1969.– 420 с.
86. Ультразвуковой аппарат для повышения эффективности распыления жидких металлов / В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, С.В. Змановский, С.С. Хмелев. – Техническая акустика. – 2012. – Т. 12. – С. 1.
87. Федоров, И.М. Теория и расчет процессов сушки во взвешенном состоянии / И.М. Федоров – М.: Госэнергоиздат, 1955. – 176 с.
88. Шатульский, А.А. Применение методов прототипирования для изготовления изделий машиностроения / А.А. Шатульский, М.А. Шаповалова // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – №1. – С.24-29.
89. Шишковский, И.В. Перспективы быстрого прототипирования для изготовления моделей и литейных форм / И.В. Шишковский // Литейное производство. – 2010. – №6. – С.23-29.

90. Экспериментальные исследования критерия дробления расплавов/ Ю.И. Найда, О.С. Ничипоренко, А.В. Медведовский, Ю.В. Шульга// Порошковая металлургия.– 1973.– № 1.– с. 1-5.

**Приложение А**  
**Результаты моделирования струи воздуха**  
**(начальная температура 27 °С)**

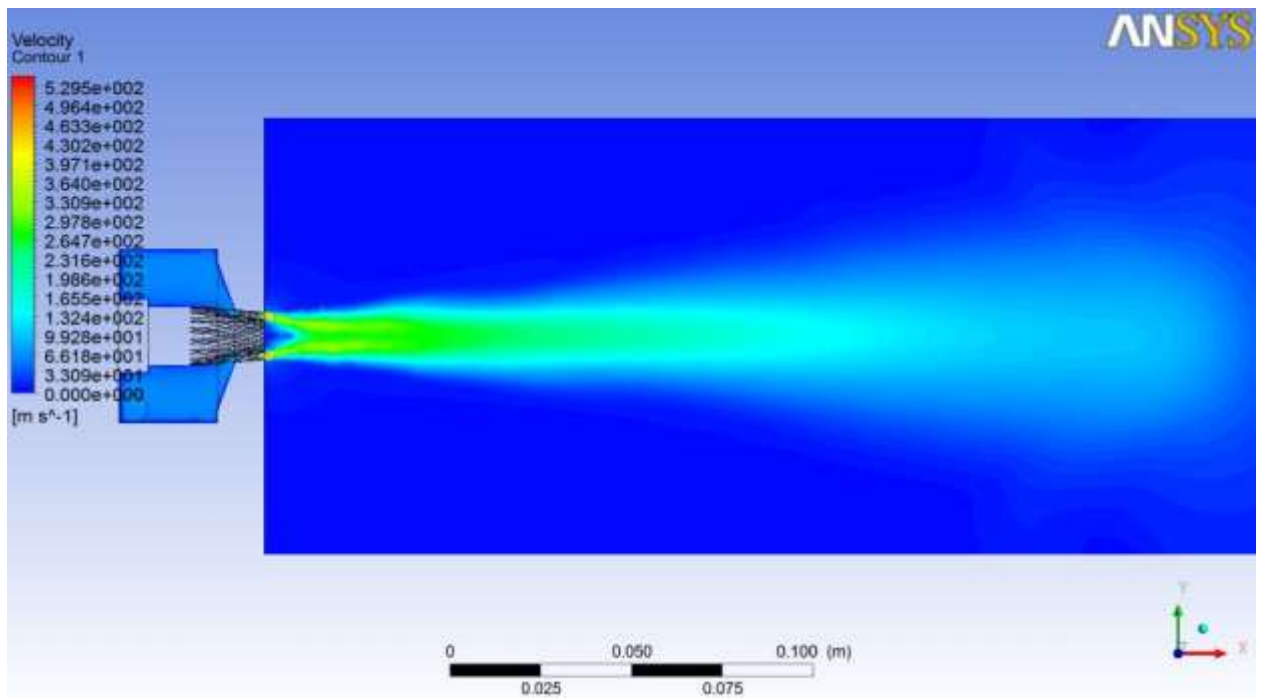


Рисунок А.1. Результаты компьютерного моделирования: скорость струи воздуха  
(начальная температура газа 27°С)

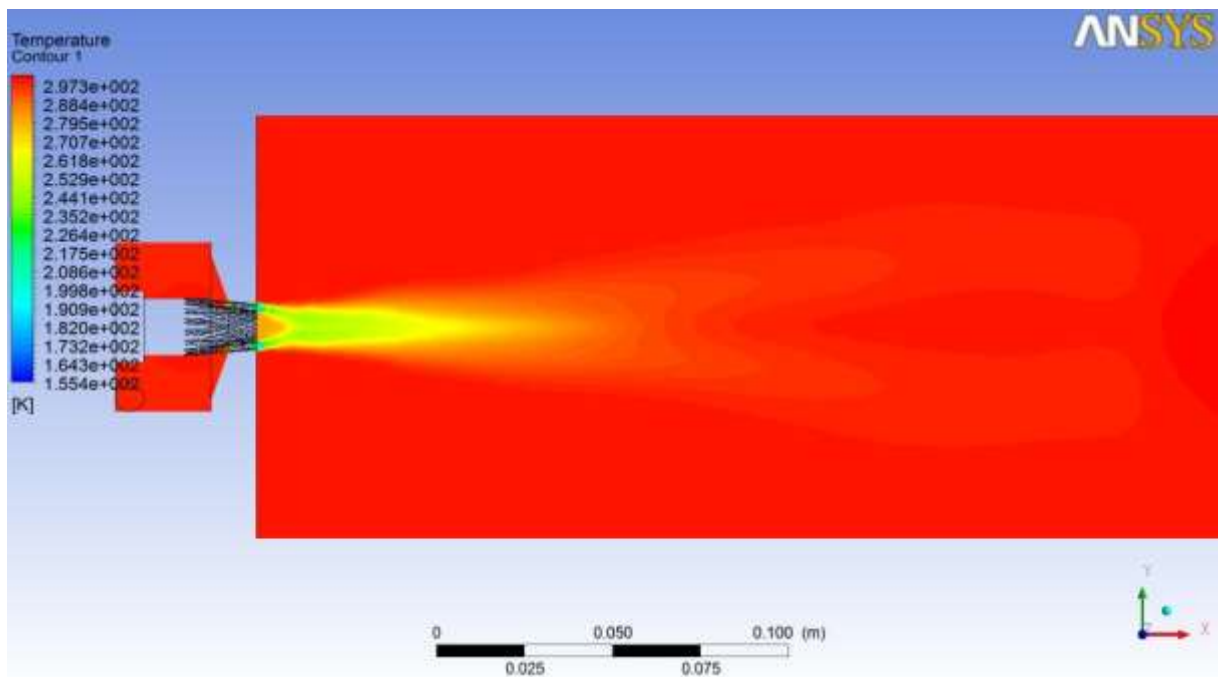


Рисунок А.2. Результаты компьютерного моделирования: температура воздуха в струе  
(начальная температура газа 27°С)

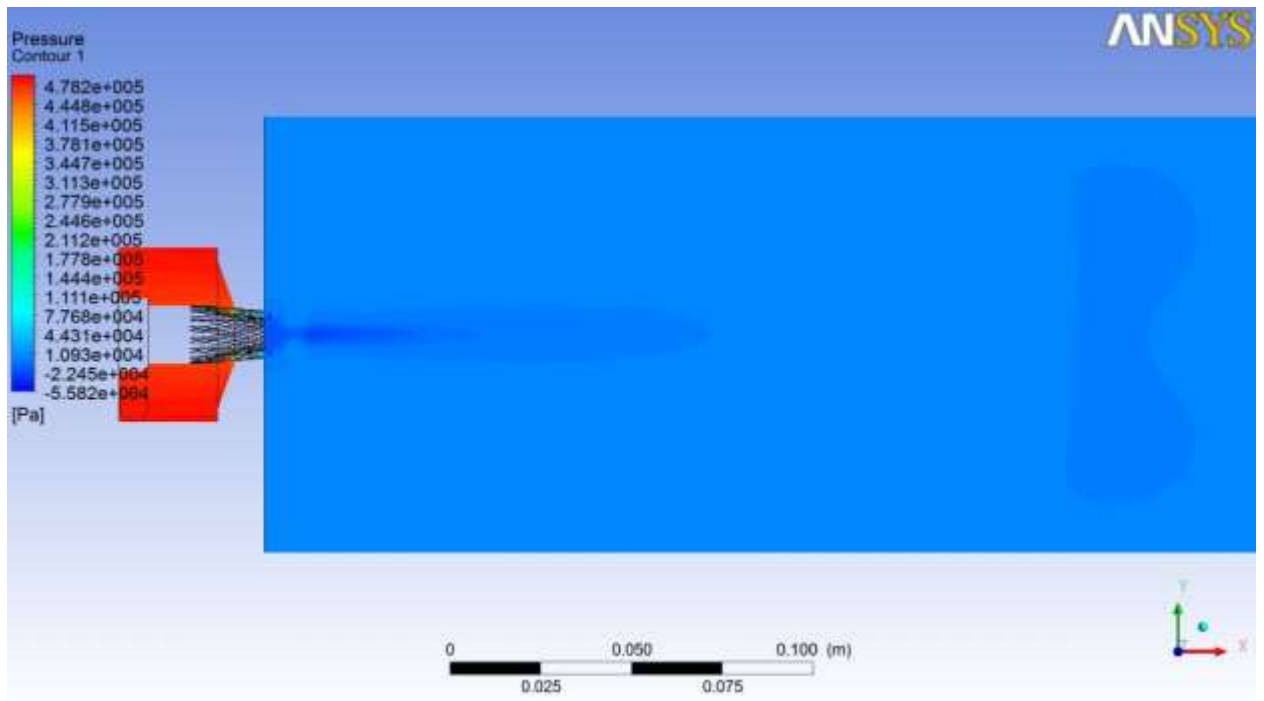


Рисунок А.3. Результаты компьютерного моделирования: давление в струе воздуха (начальная температура газа  $27^{\circ}\text{C}$ )

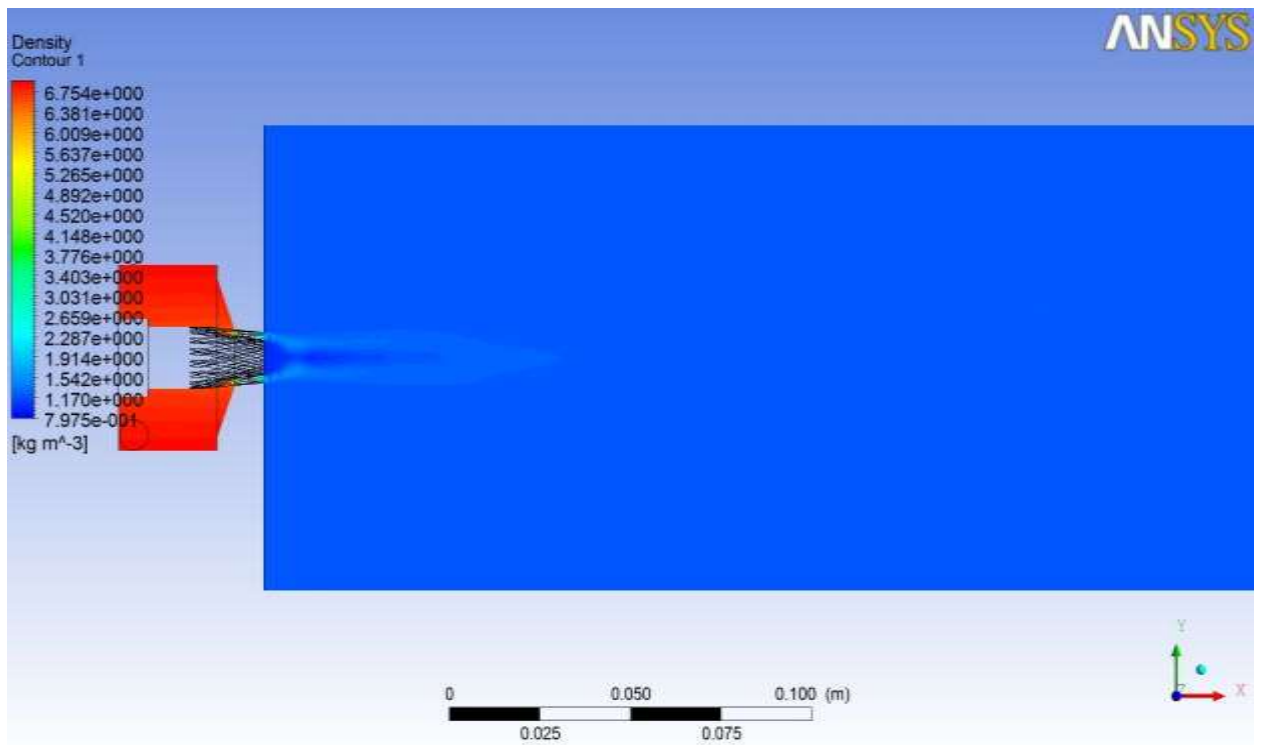


Рисунок А.4. Результаты компьютерного моделирования: плотность воздуха в струе (начальная температура газа  $27^{\circ}\text{C}$ )

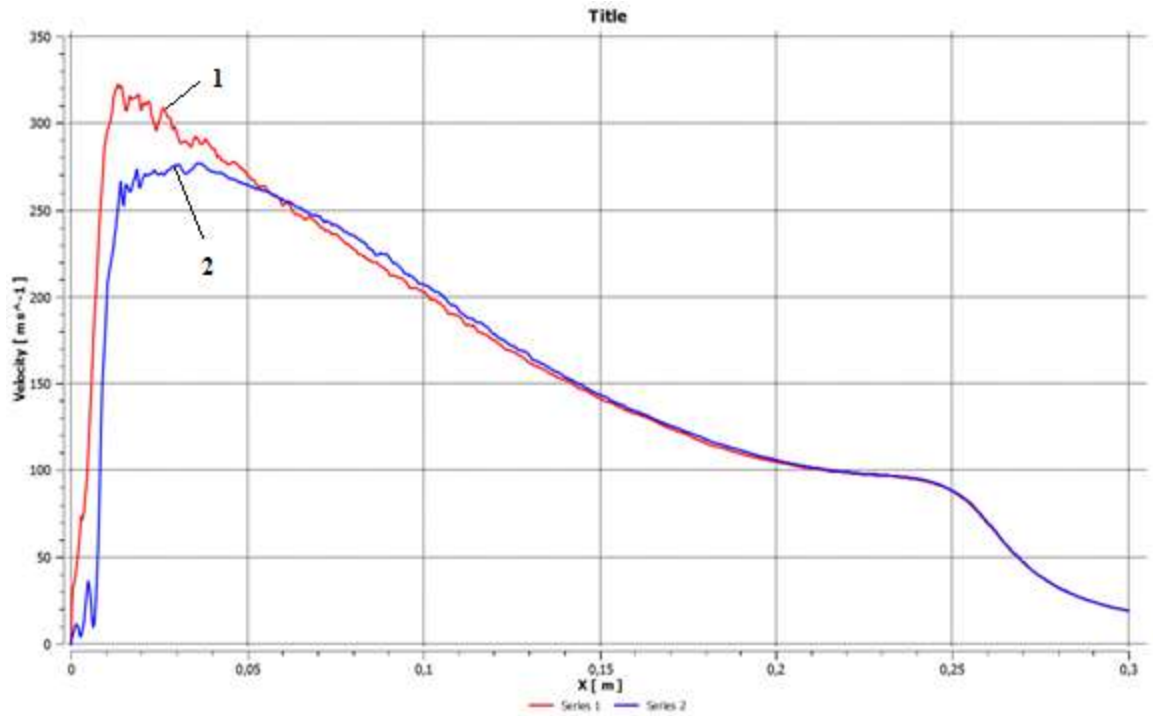


Рисунок А.5. Изменение скорости струи воздуха: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 27°C)

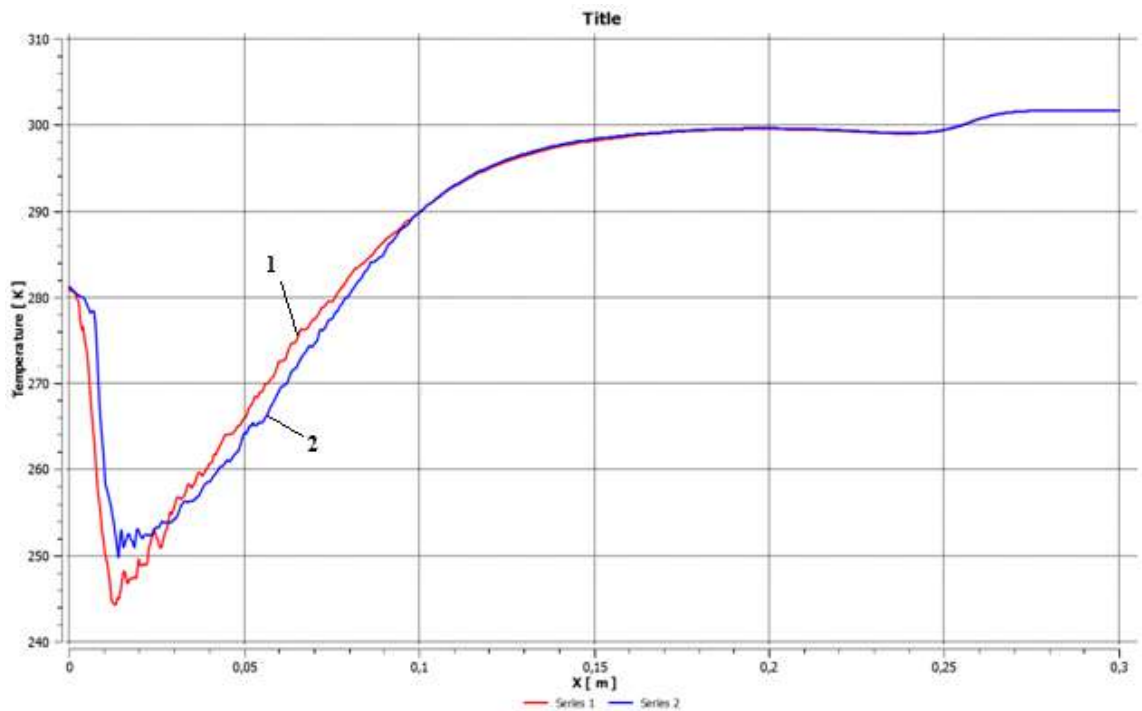


Рисунок А.6. Изменение температуры воздуха в струе: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 27°C)

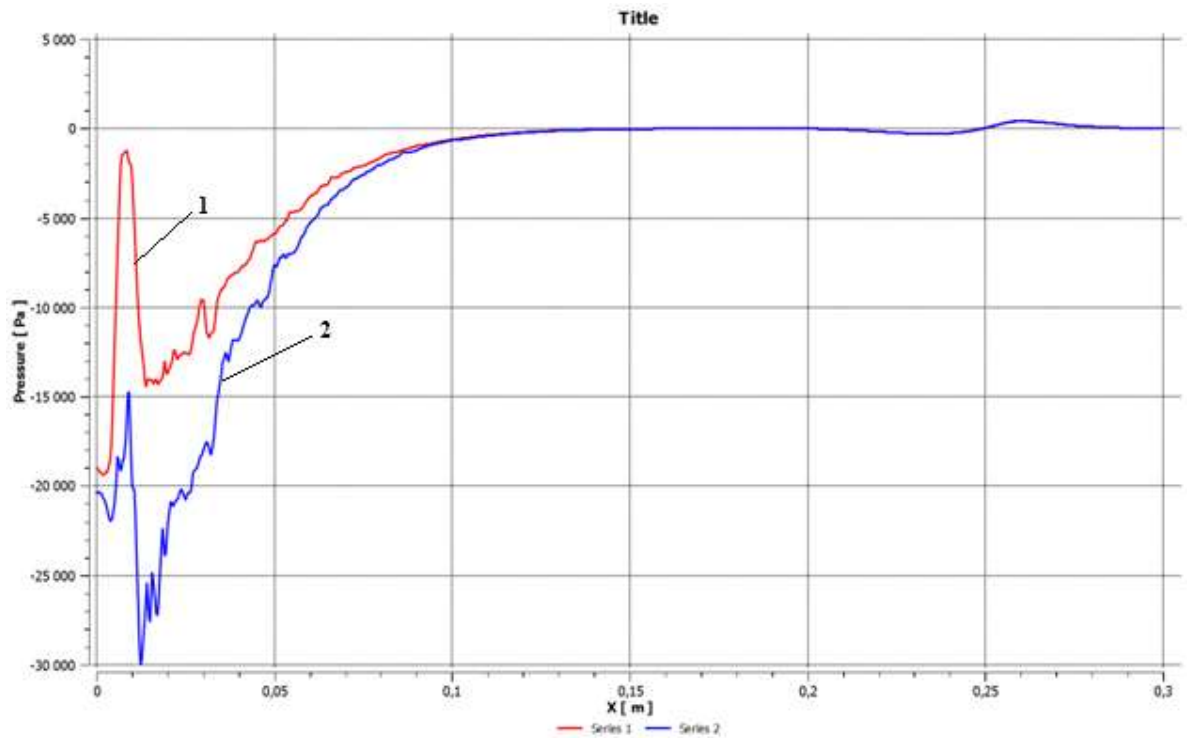


Рисунок А.7. Изменение давления в струе воздуха: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 27°C)

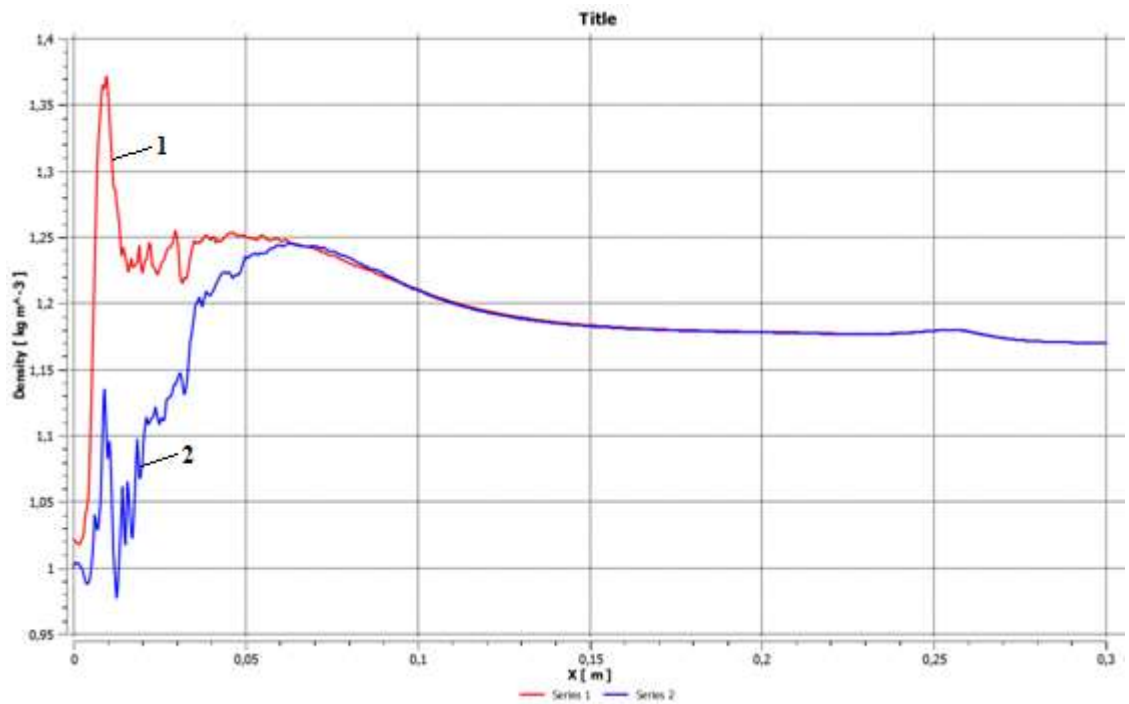


Рисунок А.8. Изменение плотности воздуха в струе: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 27°C)



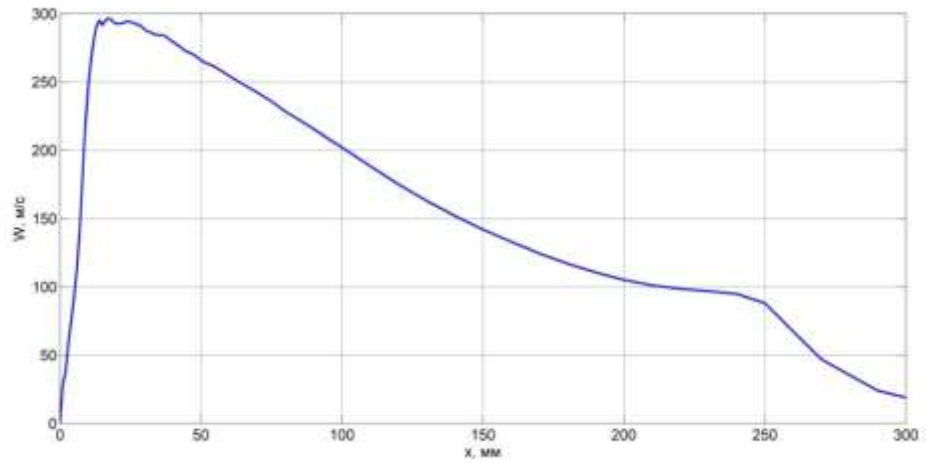


Рисунок А.9. Изменение средней скорости струи воздуха  
(начальная температура газа 27°C)

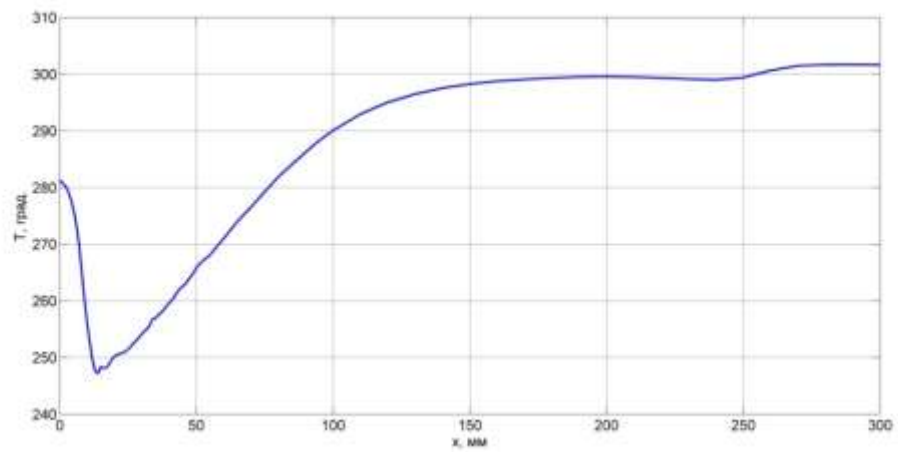


Рисунок А.10. Изменение средней температуры струи воздуха  
(начальная температура газа 27°C)

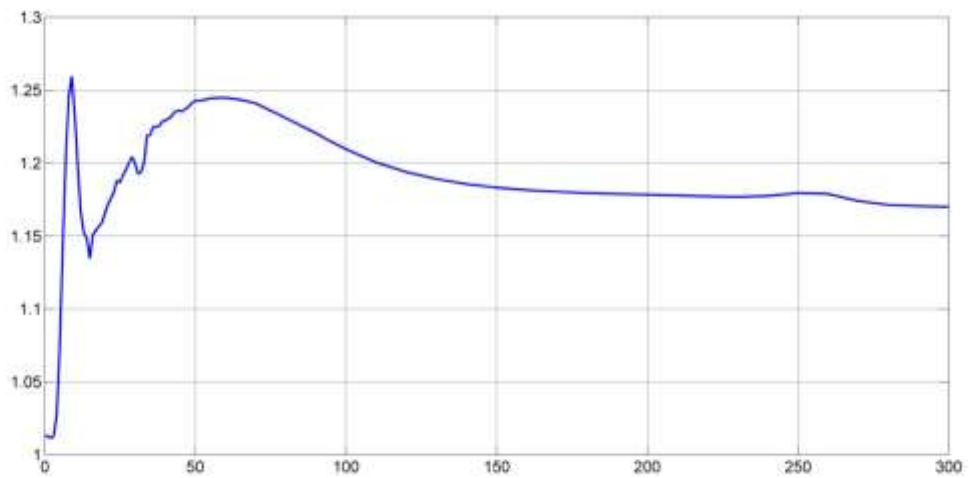


Рисунок А.11. Изменение средней плотности воздуха в струе  
(начальная температура газа 27°C)

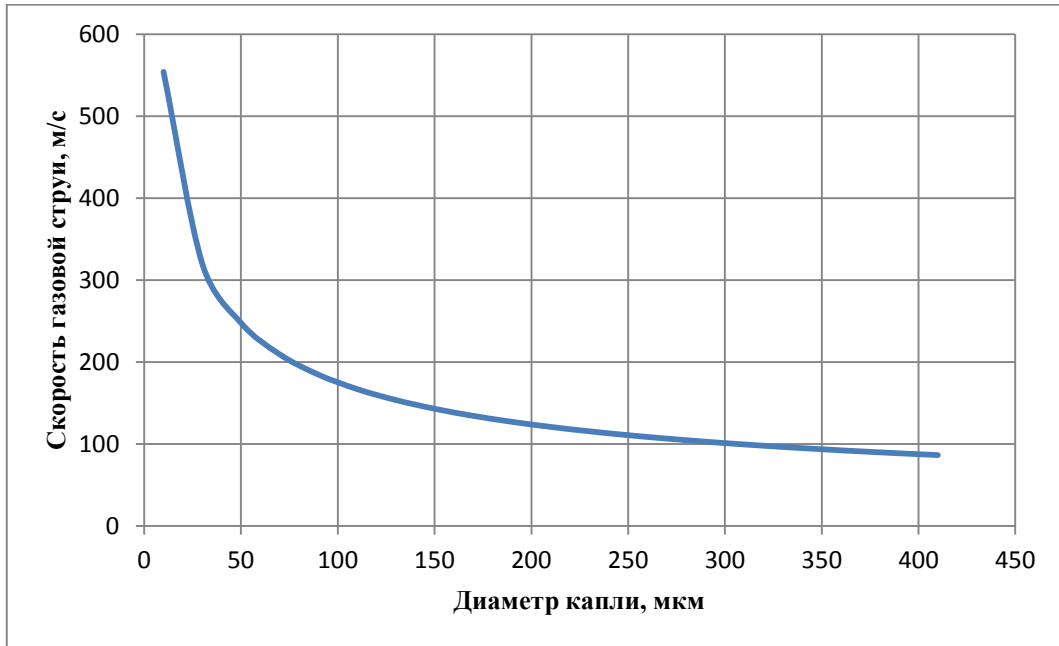


Рисунок А.12. Критическая скорость струи воздуха для дробления капель чугуна различного диаметра (начальная температура газа 27°C)

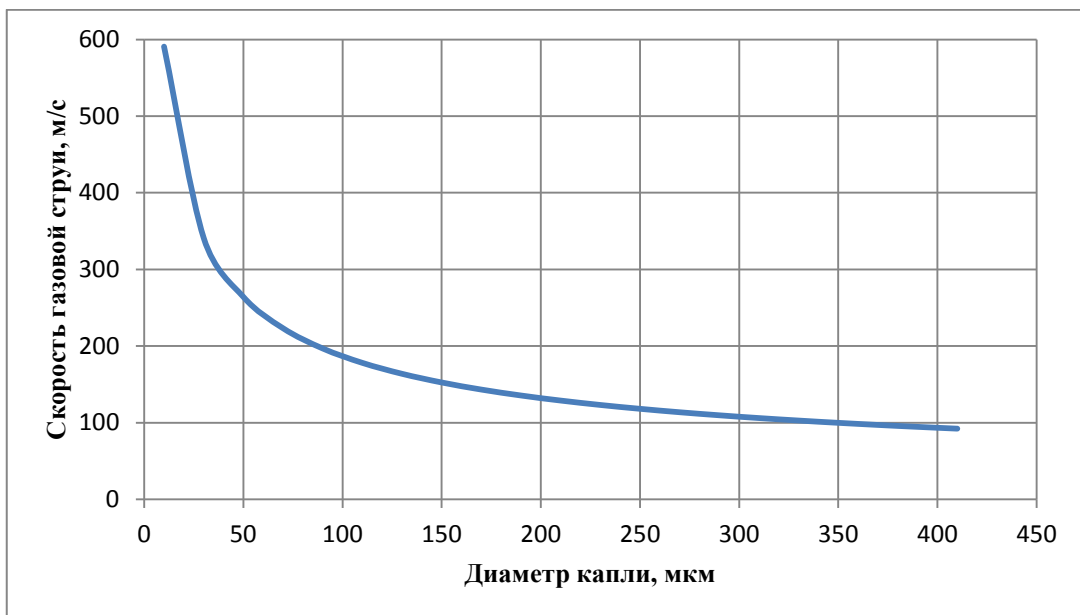


Рисунок А.13. Критическая скорость струи воздуха для дроблении капель меди различного диаметра (начальная температура газа 27°C)

**Приложение Б**  
**Результаты моделирования струи воздуха**  
**(начальная температура 300 °С)**

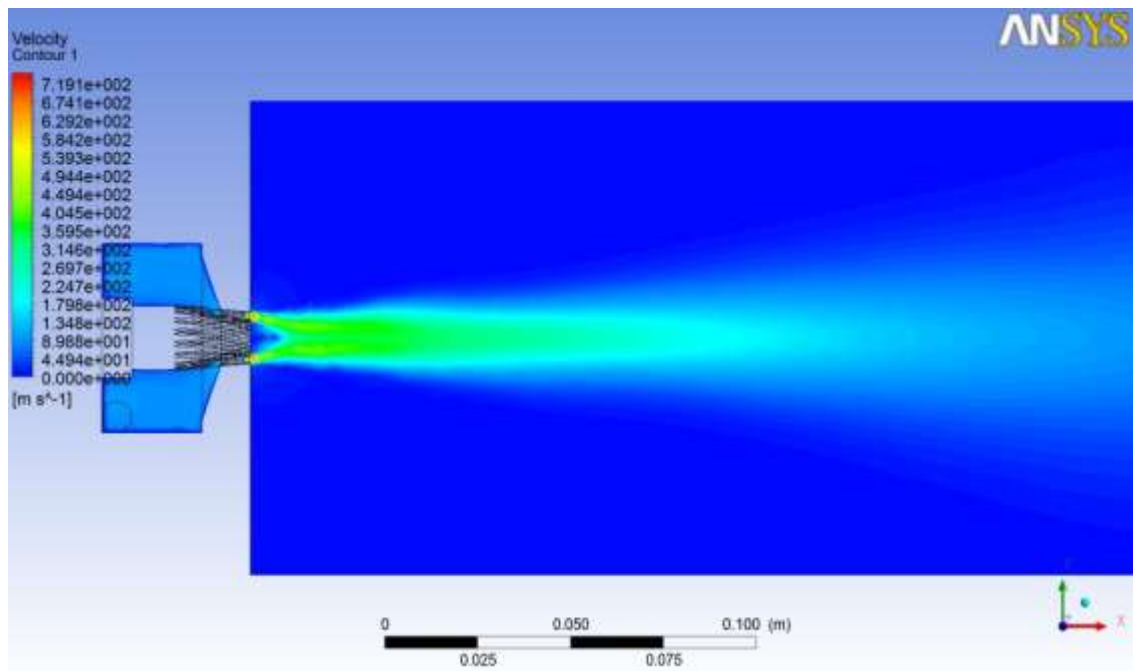


Рисунок Б.1. Результаты компьютерного моделирования: скорость струи воздуха (начальная температура газа 300°С)

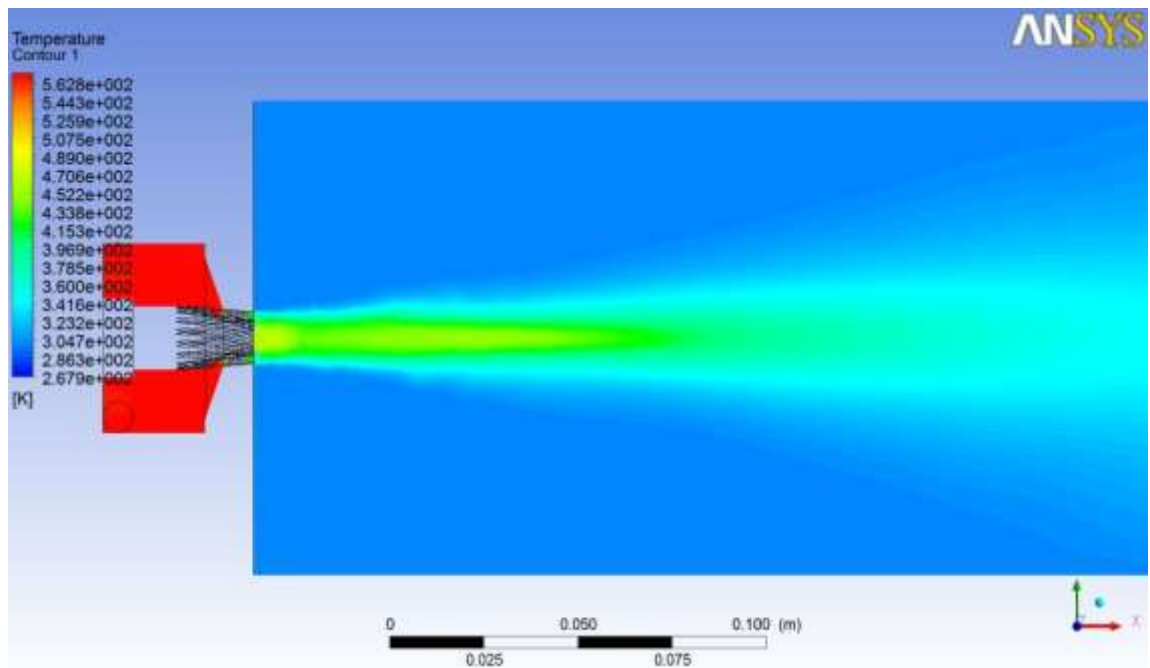


Рисунок Б.2. Результаты компьютерного моделирования: температура воздуха в струе (начальная температура газа 300°С)

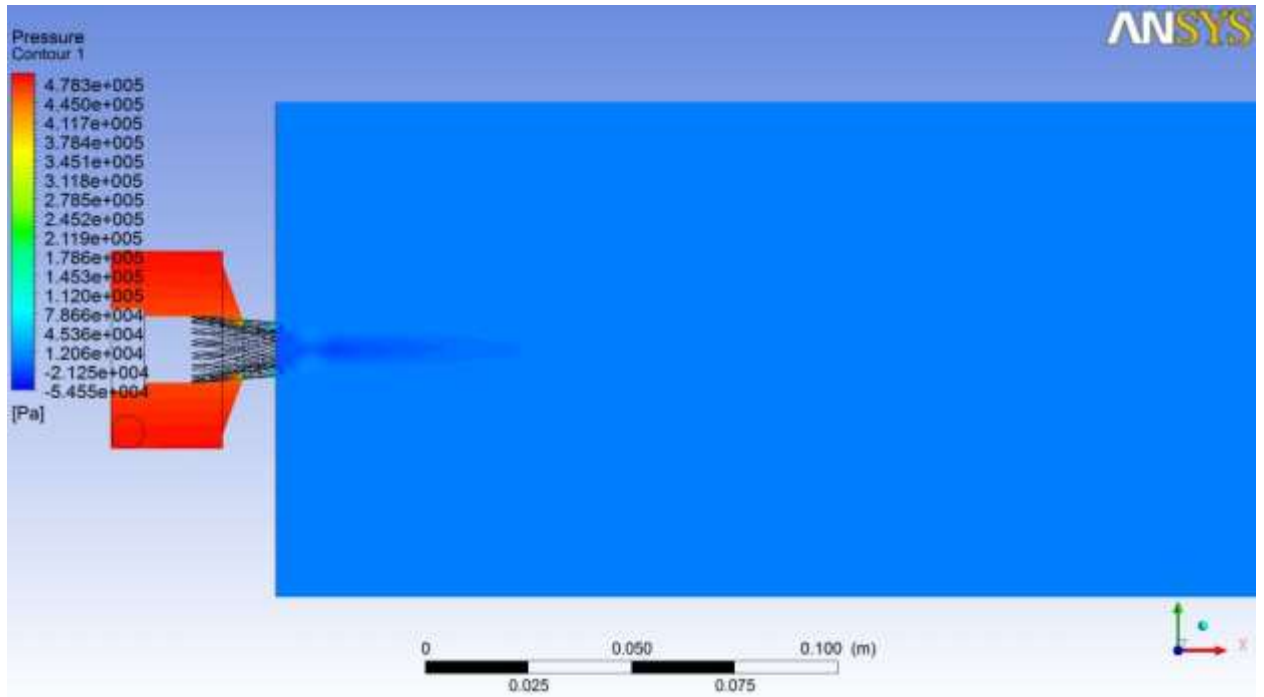


Рисунок Б.3. Результаты компьютерного моделирования: давление в струе воздуха  
(начальная температура газа 300°C)

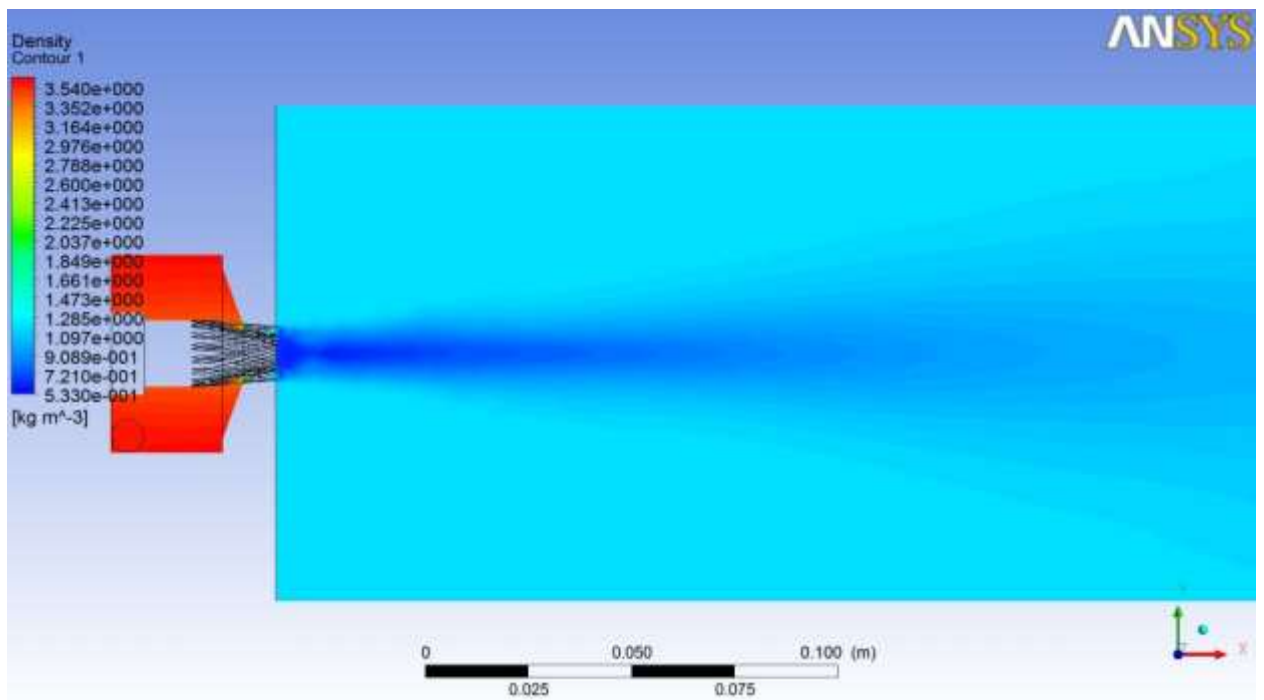


Рисунок Б.4. Результаты компьютерного моделирования: плотность воздуха в струе  
(начальная температура газа 300°C)

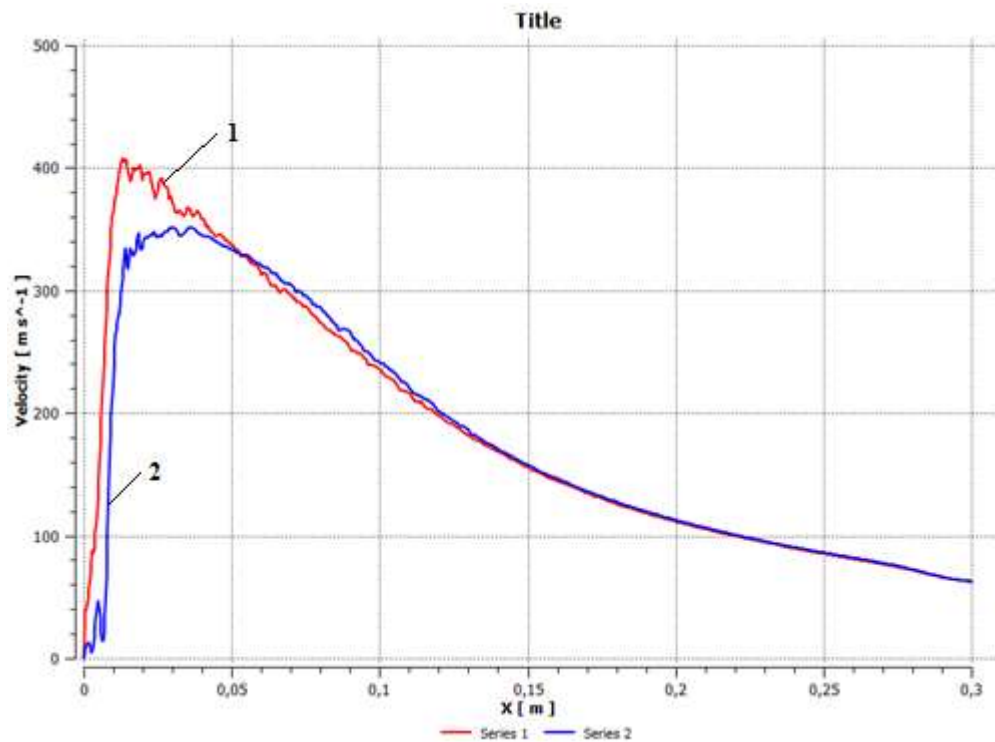


Рисунок Б.5. Изменение скорости струи воздуха: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 300°C)

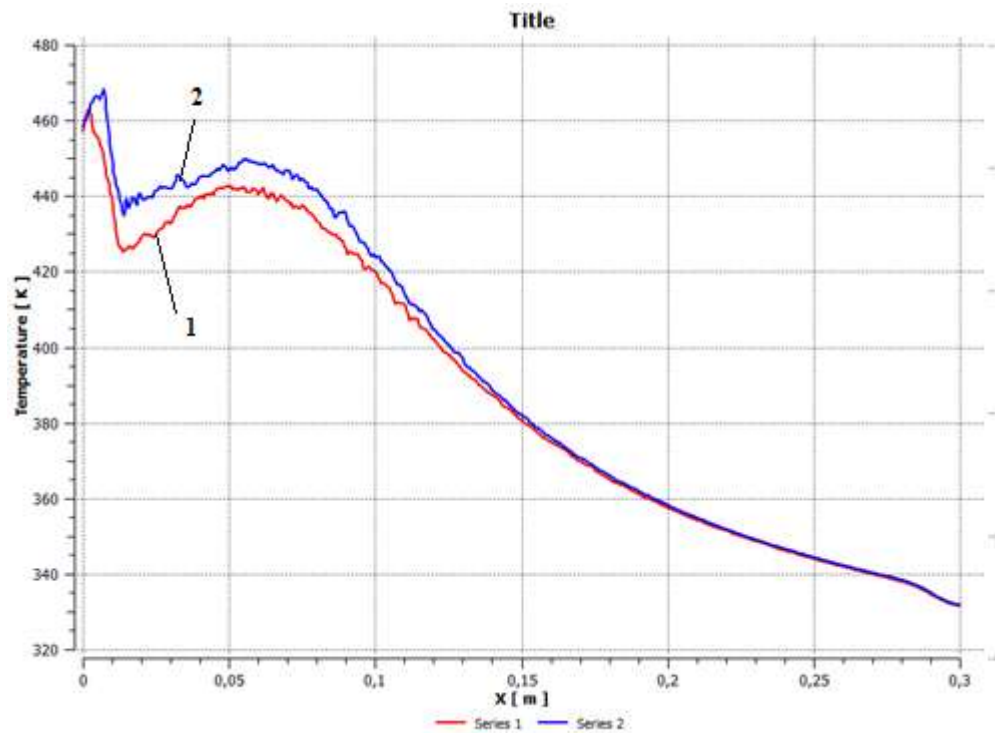


Рисунок Б.6. Изменение температуры воздуха в струе: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 300°C)

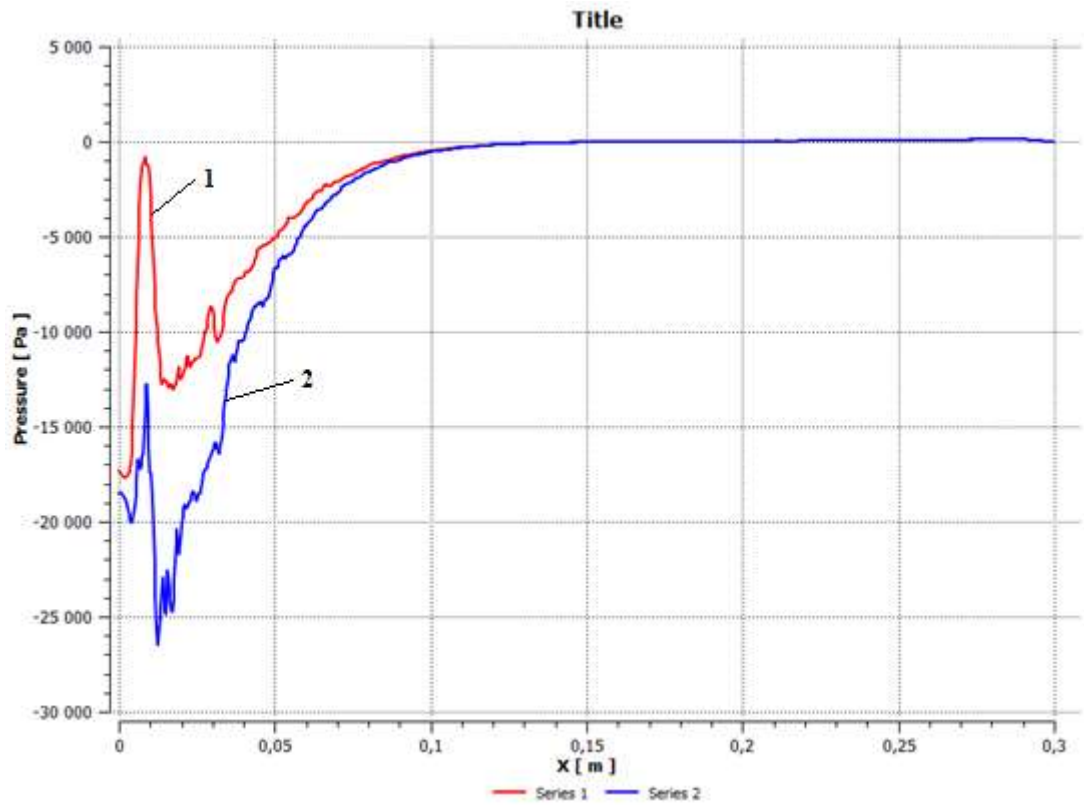


Рисунок Б.7. Изменение давления в струе воздуха: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 300°C)

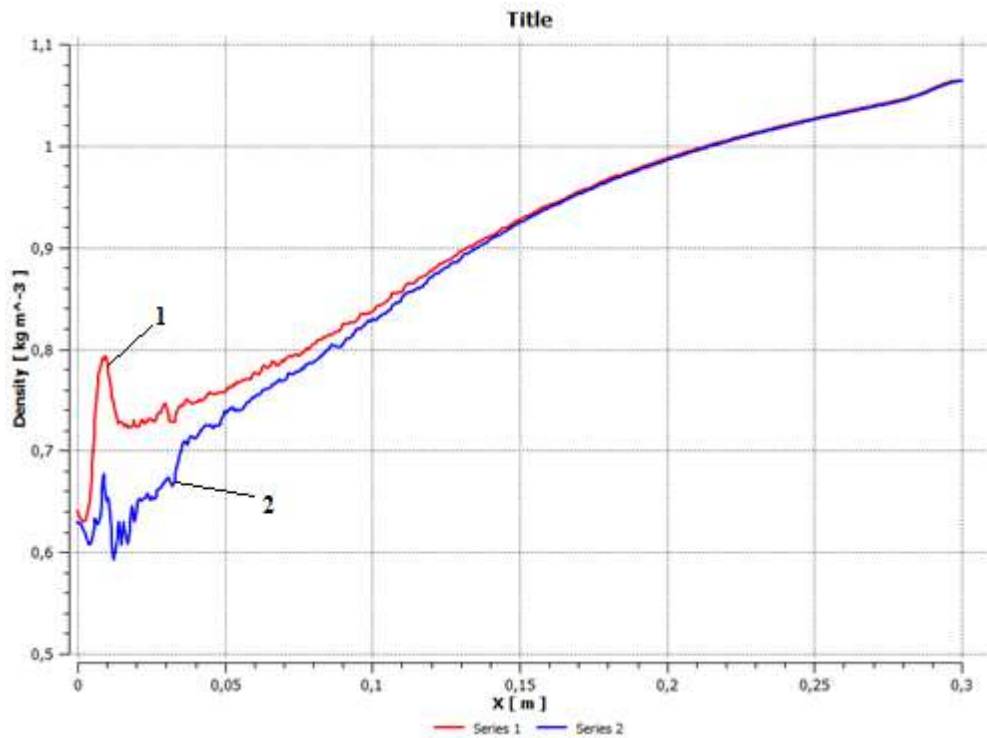


Рисунок Б.8. Изменение плотности воздуха в струе: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 300°C)

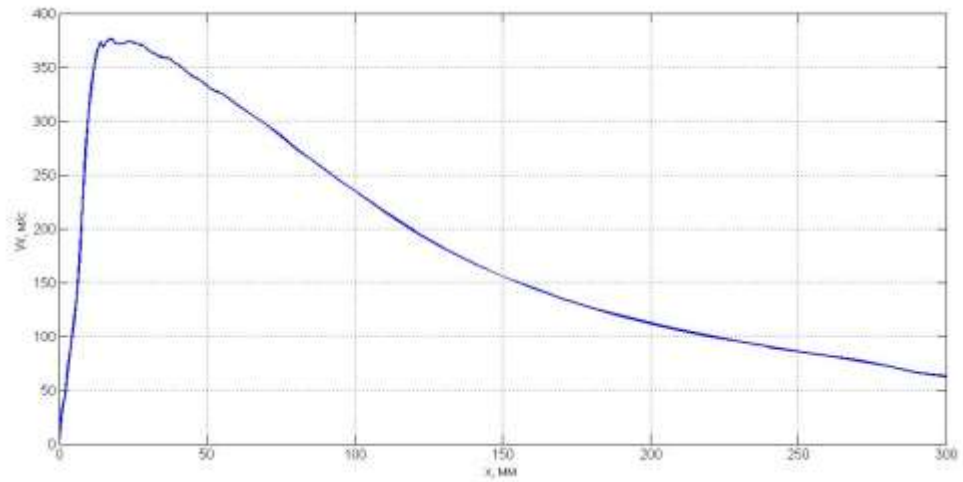


Рисунок Б.9. Изменение средней скорости струи воздуха  
(начальная температура газа 300°C)

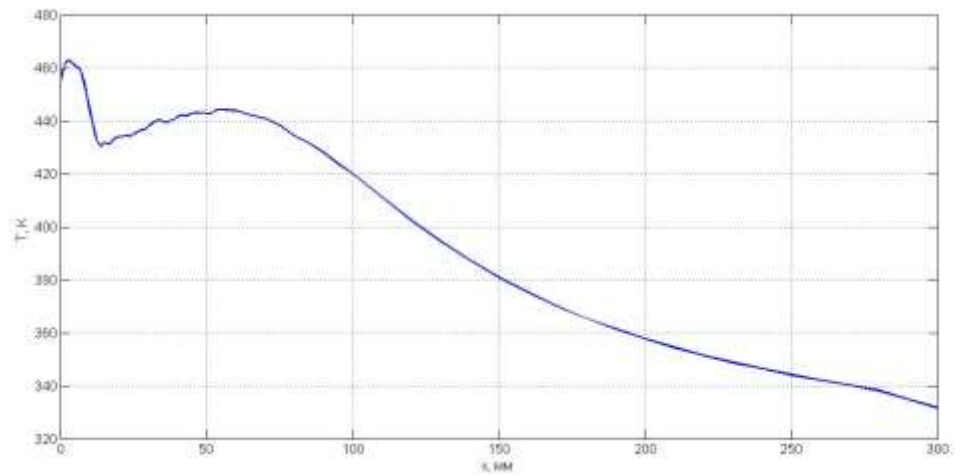


Рисунок Б.10. Изменение средней температуры струи воздуха  
(начальная температура газа 300°C)

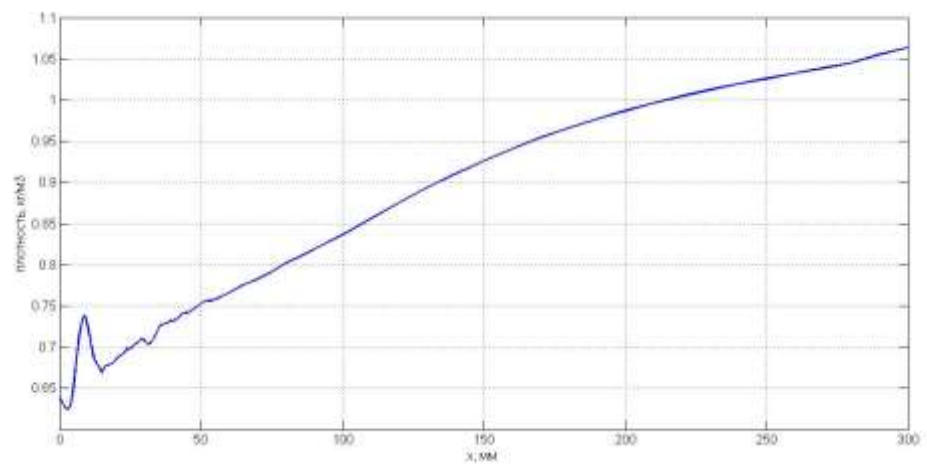


Рисунок Б.11. Изменение средней плотности воздуха в струе  
(начальная температура газа 300°C)

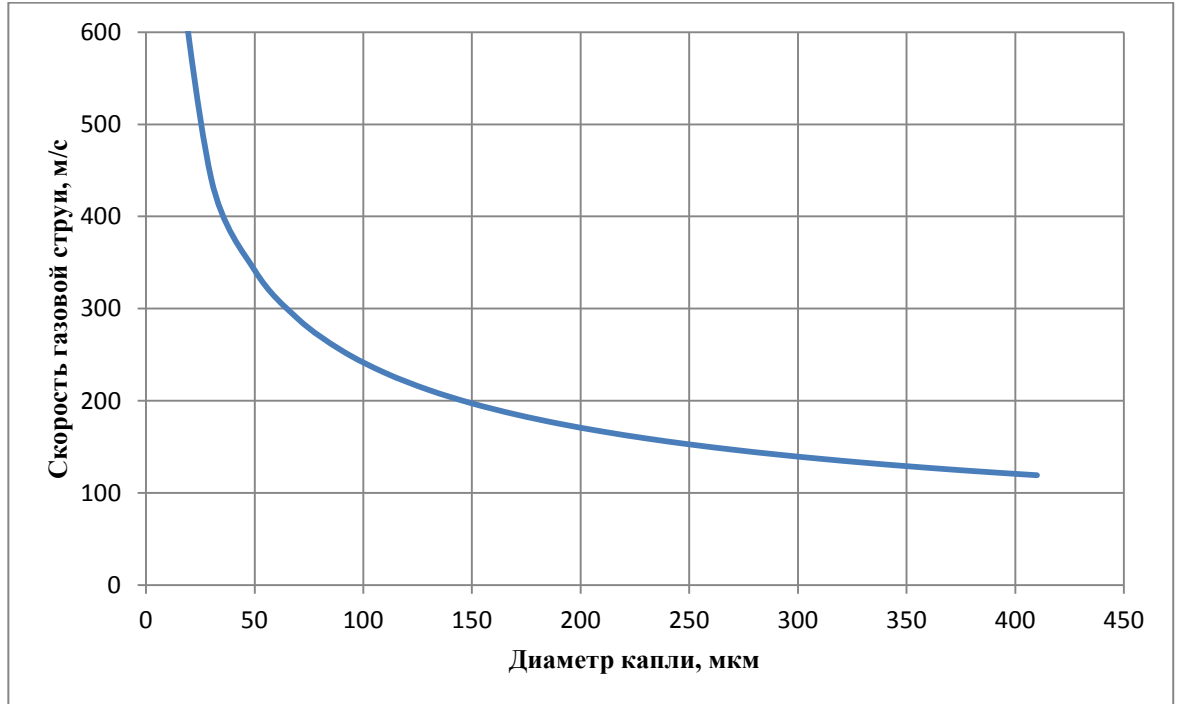


Рисунок Б.12. Критическая скорость струи воздуха для дробления капель чугуна различного диаметра (начальная температура газа 300°C)

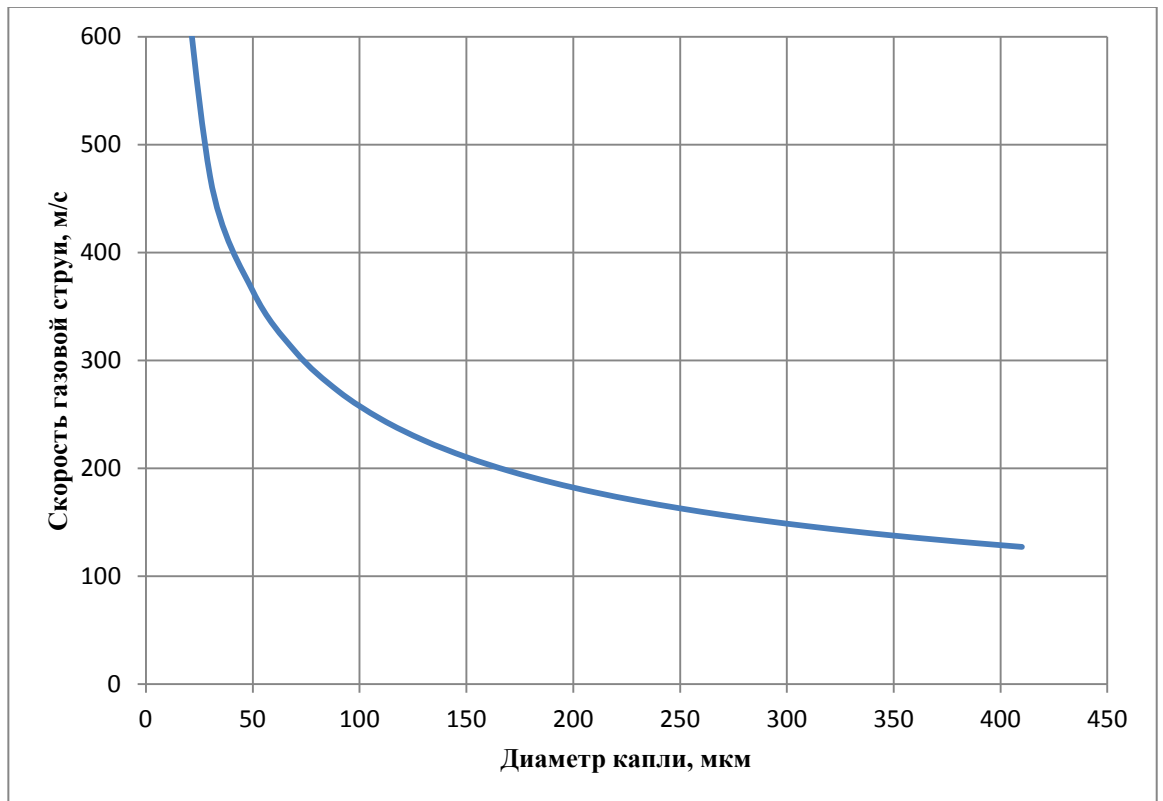


Рисунок Б.13. Критическая скорость струи воздуха для дробления капель меди различного диаметра (начальная температура газа 300°C)



**Приложение В**  
**Результаты моделирования струи аргона**  
**(начальная температура 27 °С)**

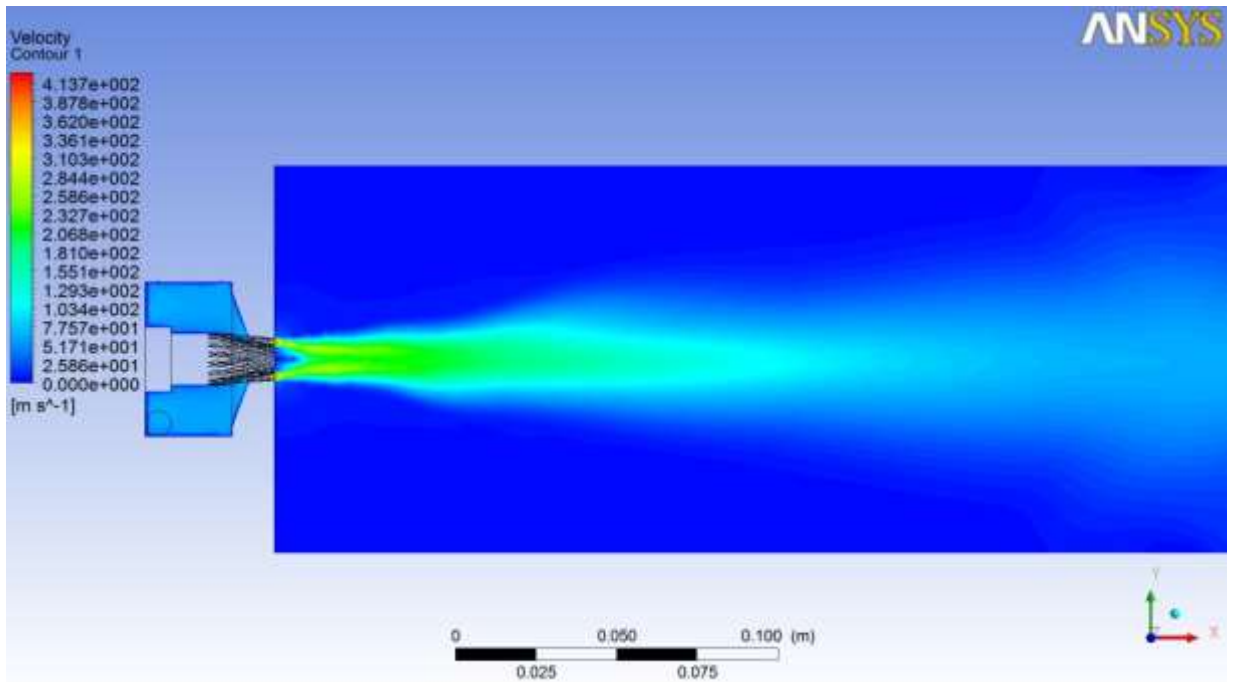


Рисунок В.1. Результаты компьютерного моделирования: скорость струи аргона  
(начальная температура газа 27°С)

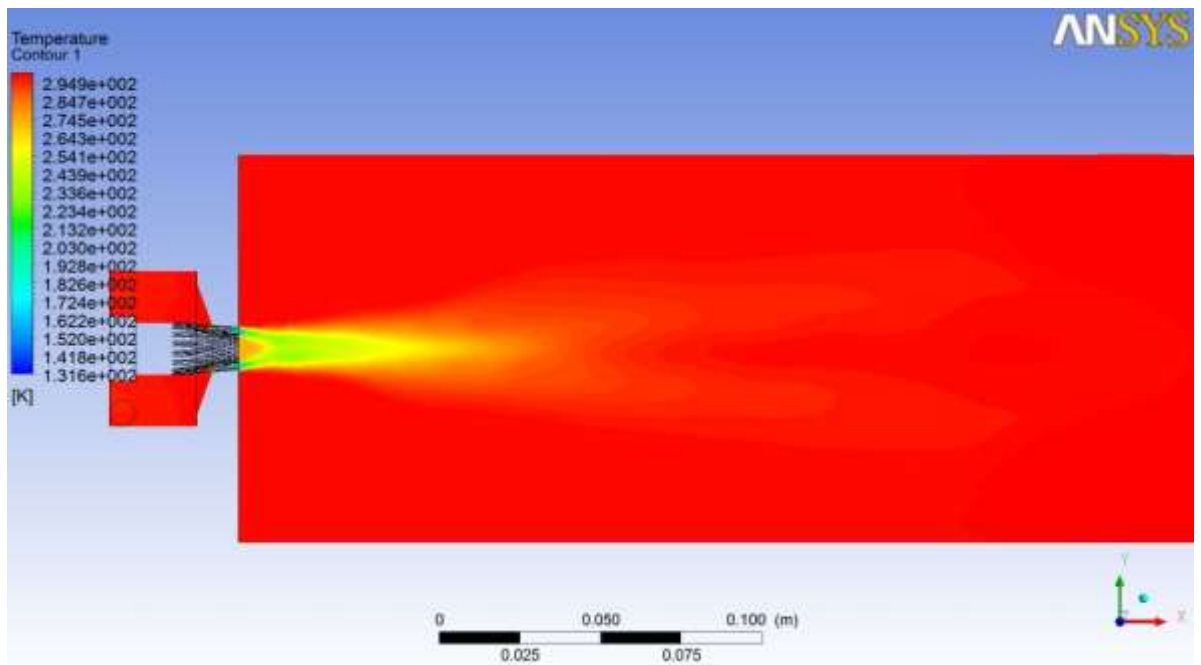


Рисунок В.2. Результаты компьютерного моделирования: температура аргона в струе  
(начальная температура газа 27°С)

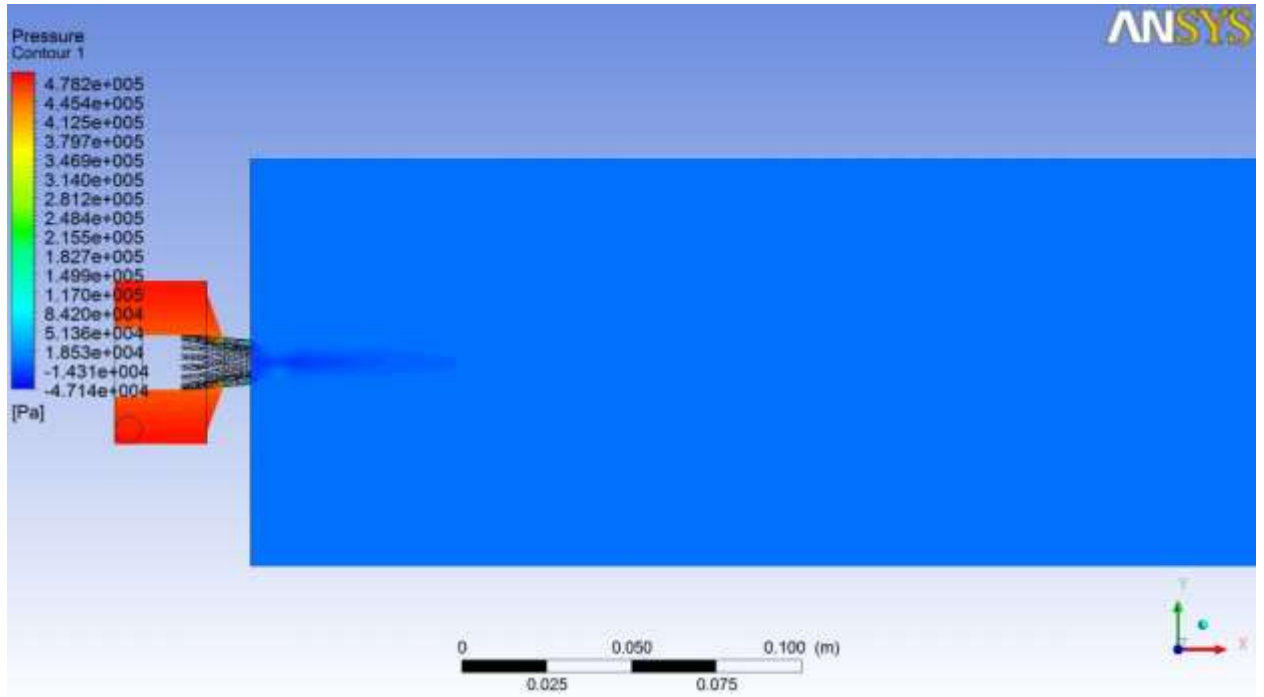


Рисунок В.3. Результаты компьютерного моделирования: давление в струе аргона  
(начальная температура газа  $27^\circ\text{C}$ )

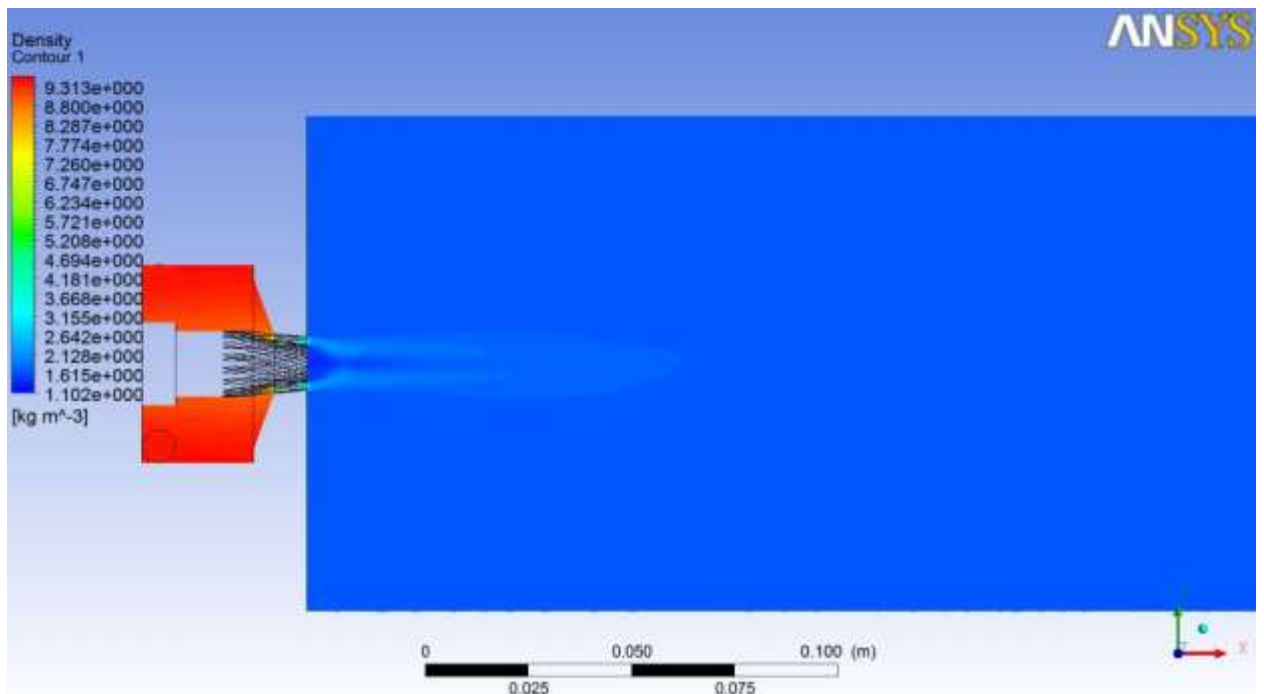


Рисунок В.4. Результаты компьютерного моделирования: плотность аргона в струе  
(начальная температура газа  $27^\circ\text{C}$ )

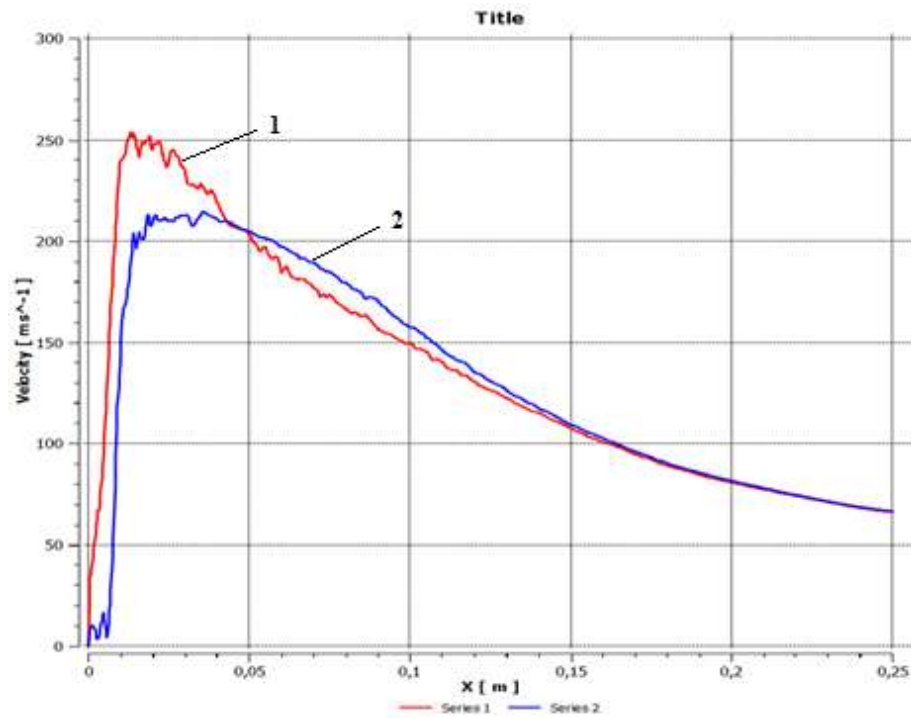


Рисунок В.5. Изменение скорости струи аргона: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 27°C)

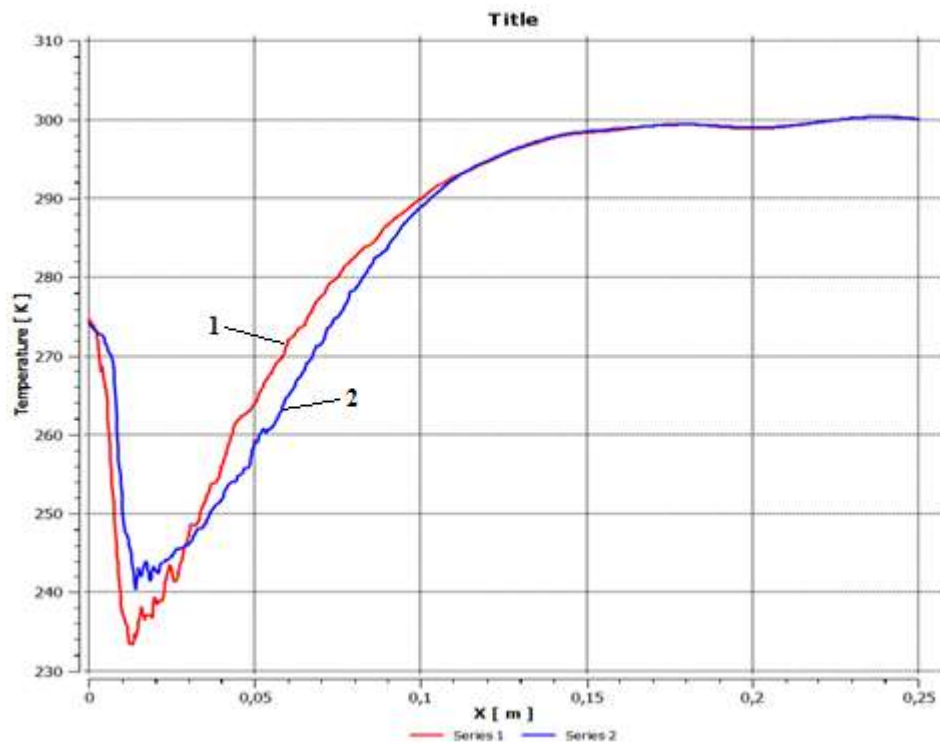


Рисунок В.6. Изменение температуры аргона в струе: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 27°C)

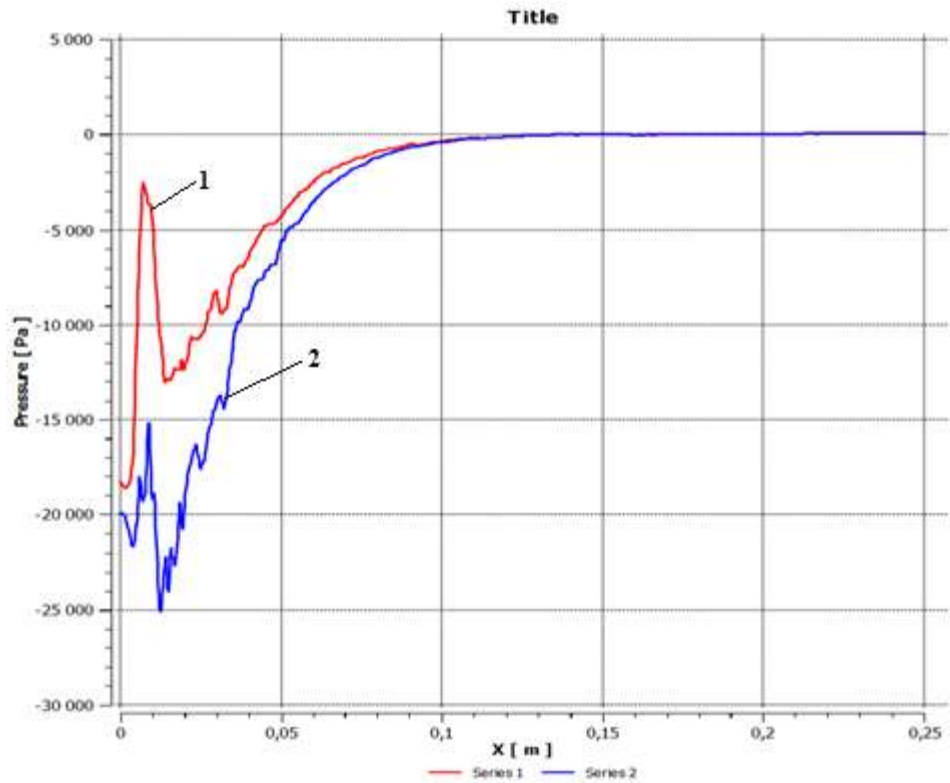


Рисунок В.7. Изменение давления в струе аргона: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 27°C)

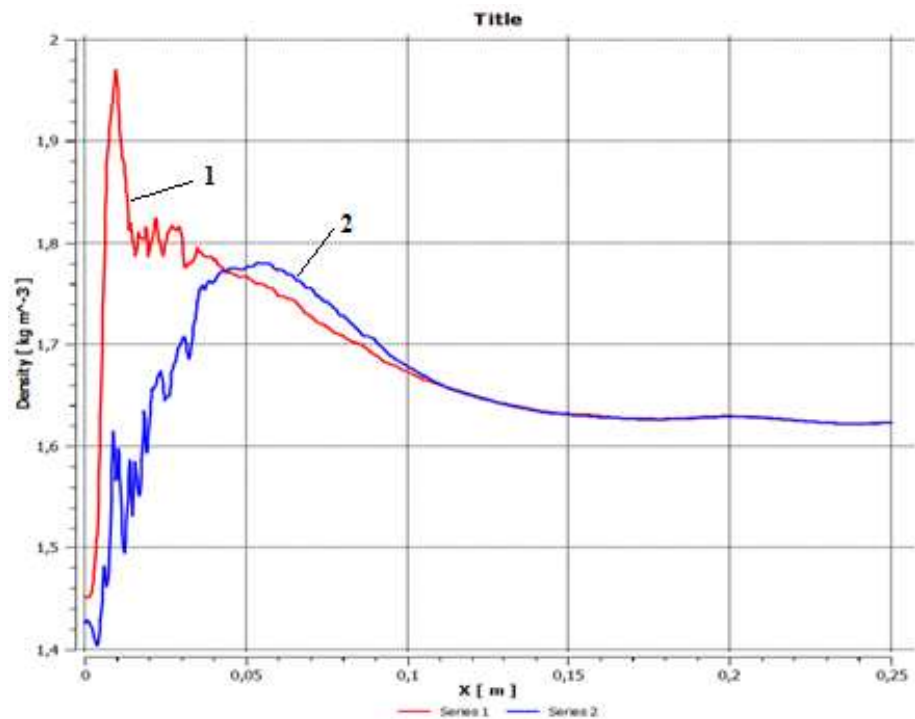


Рисунок В.8. Изменение плотности аргона в струе: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 27°C)

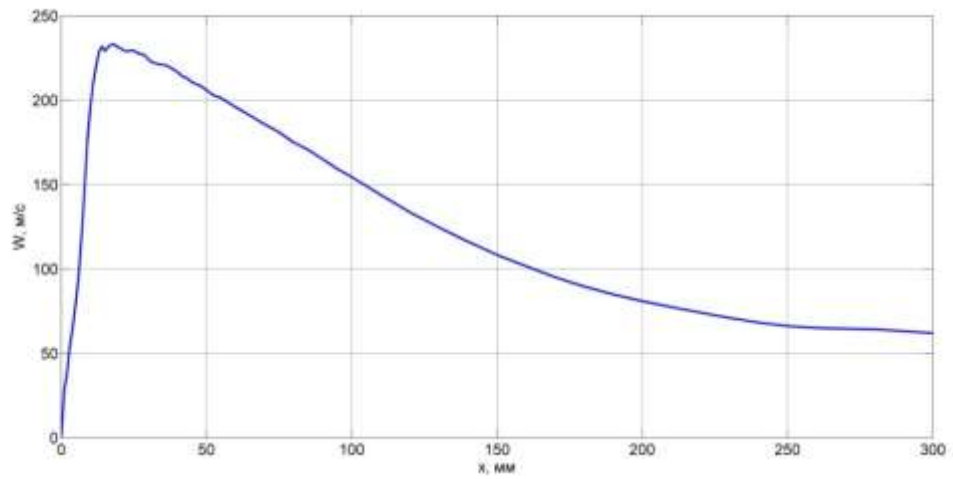


Рисунок В.9. Изменение средней скорости струи аргона  
(начальная температура газа 27°C)

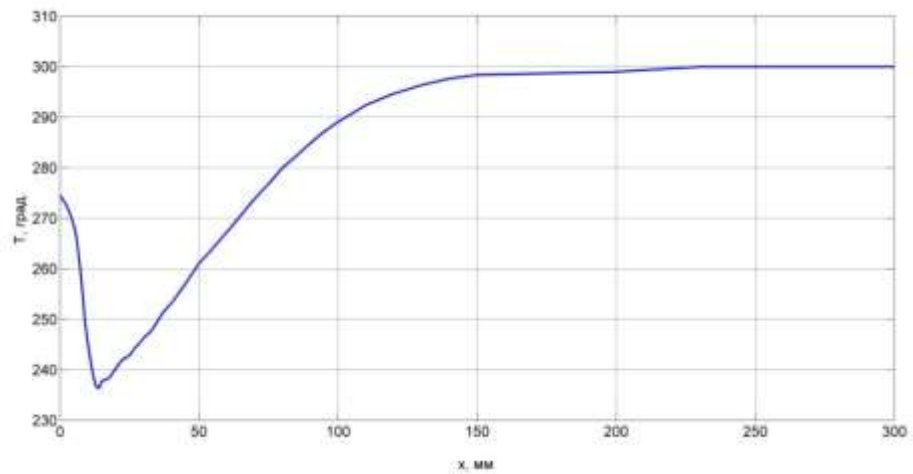


Рисунок В.10. Изменение средней температуры струи аргона  
(начальная температура газа 27°C)

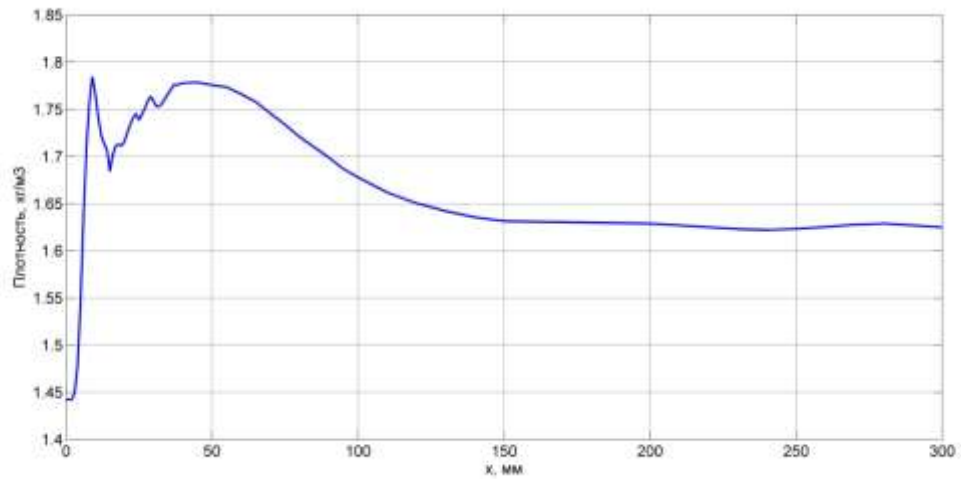


Рисунок В.11. Изменение средней плотности аргона в струе

(начальная температура газа 27°C)

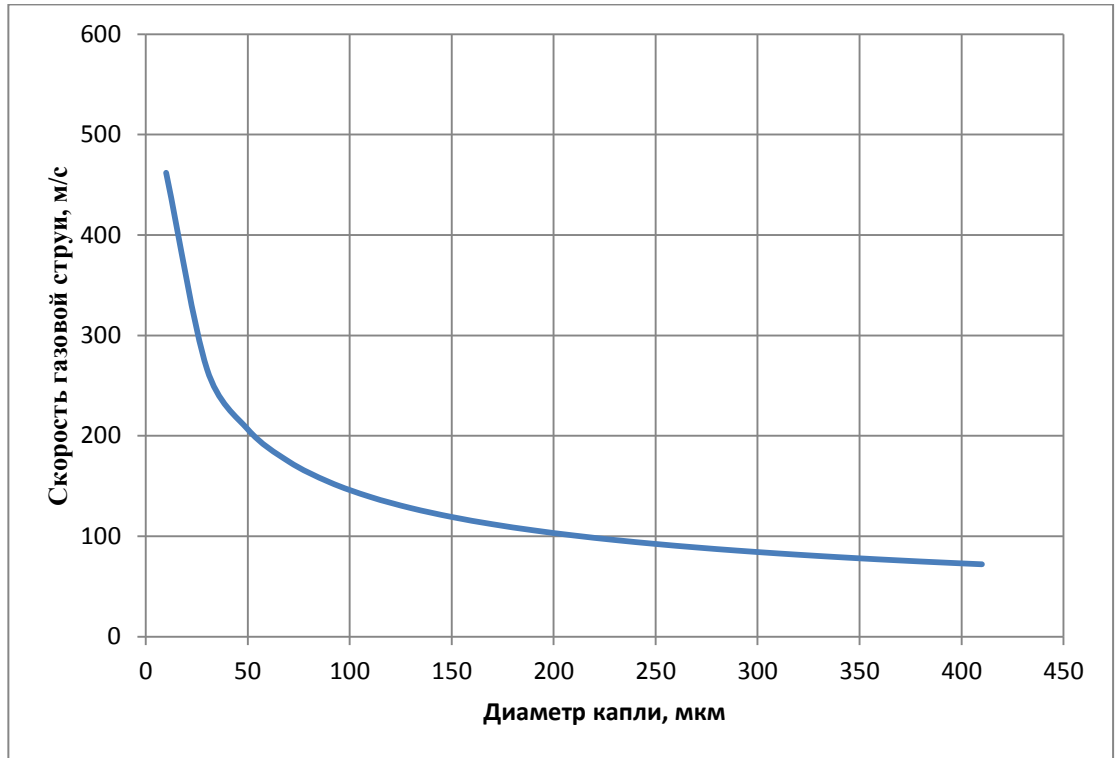


Рисунок В.12. Критическая скорость струи аргона для дробления капель чугуна различного диаметра (начальная температура газа 27°C)

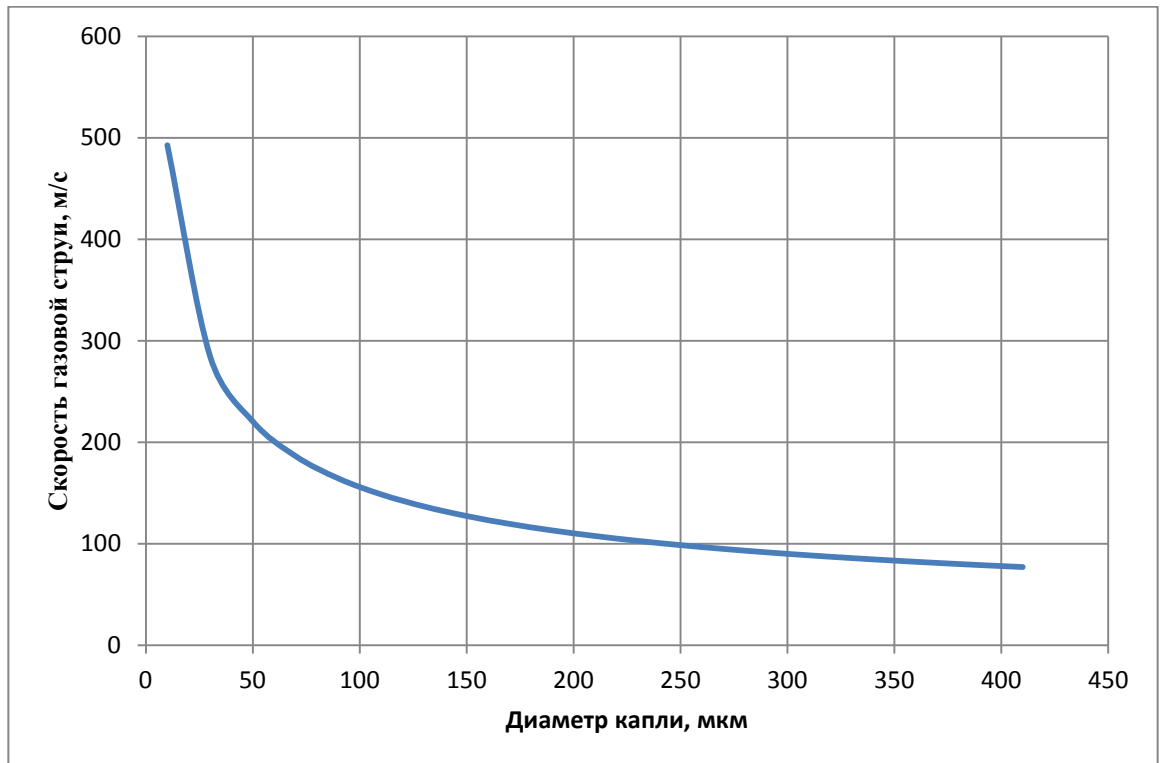


Рисунок В.13. Критическая скорость струи аргона для дробления капель меди различного диаметра (начальная температура газа 27°C)

**Приложение Г**  
**Результаты моделирования струи аргона**  
**(начальная температура 300 °С)**

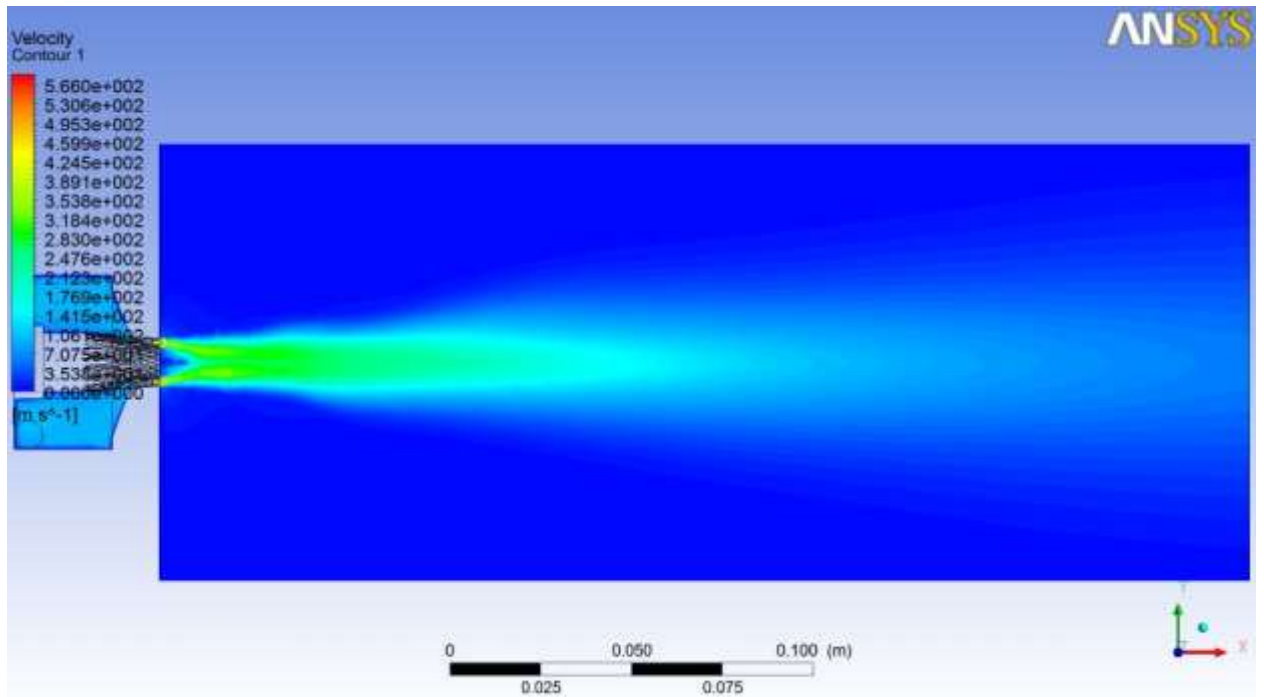


Рисунок Г.1. Результаты компьютерного моделирования: скорость струи аргона  
(начальная температура газа 300°С)

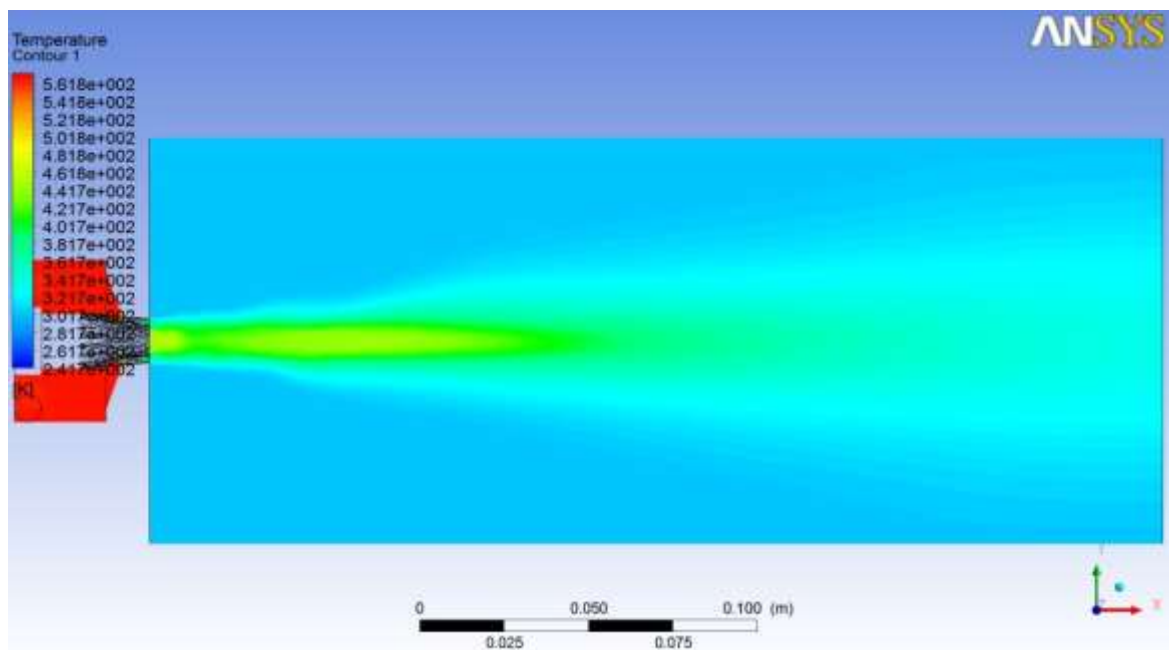


Рисунок Г.2. Результаты компьютерного моделирования: температура аргона в струе  
(начальная температура газа 300°С)

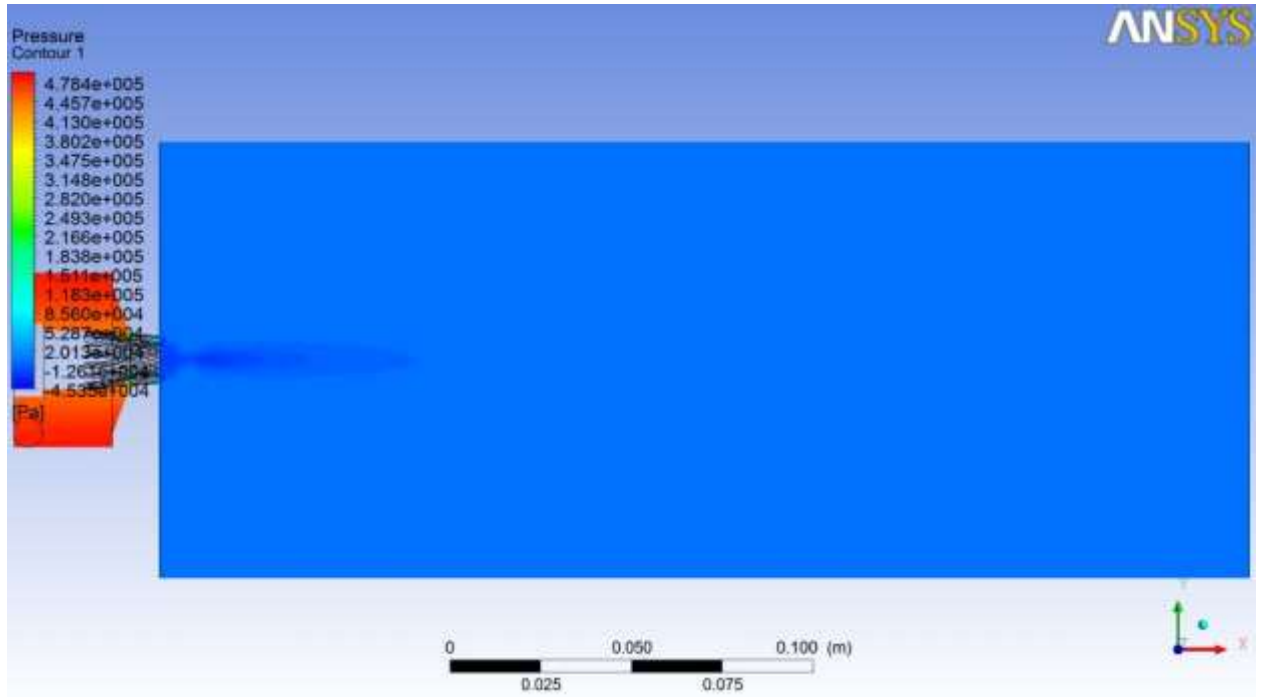


Рисунок Г.3. Результаты компьютерного моделирования: давление в струе аргона  
(начальная температура газа  $300^{\circ}\text{C}$ )

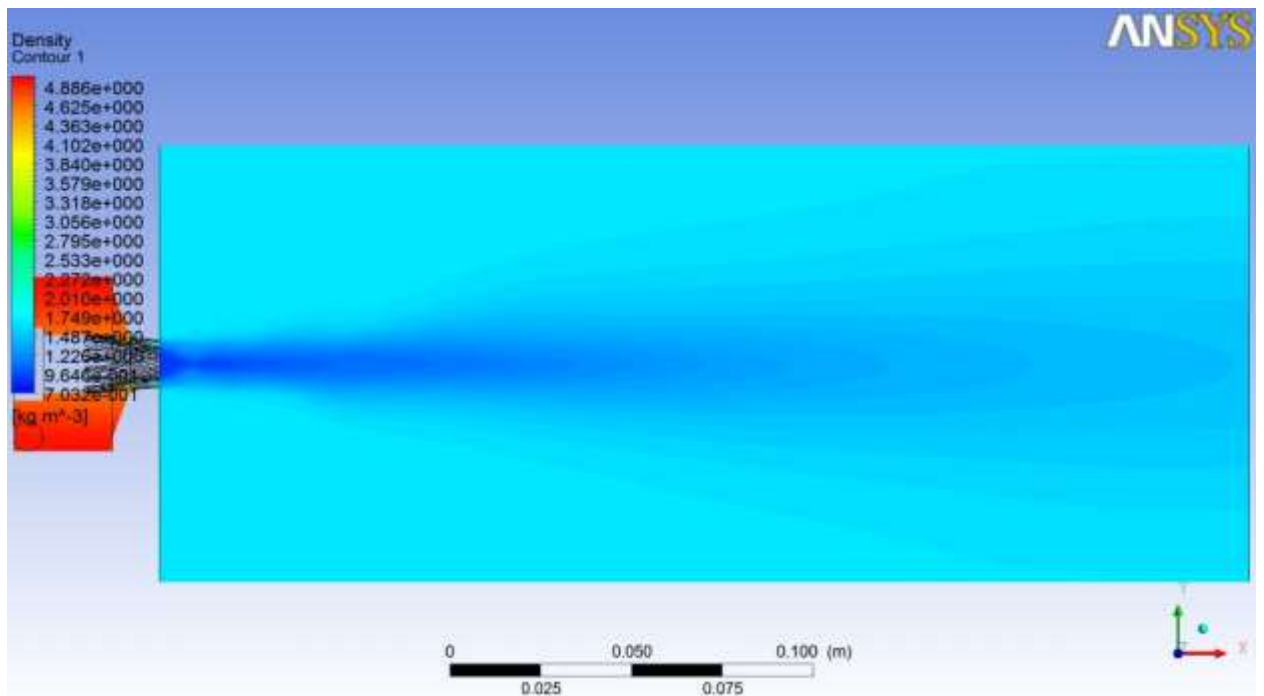


Рисунок Г.4. Результаты компьютерного моделирования: плотность аргона в струе  
(начальная температура газа  $300^{\circ}\text{C}$ )



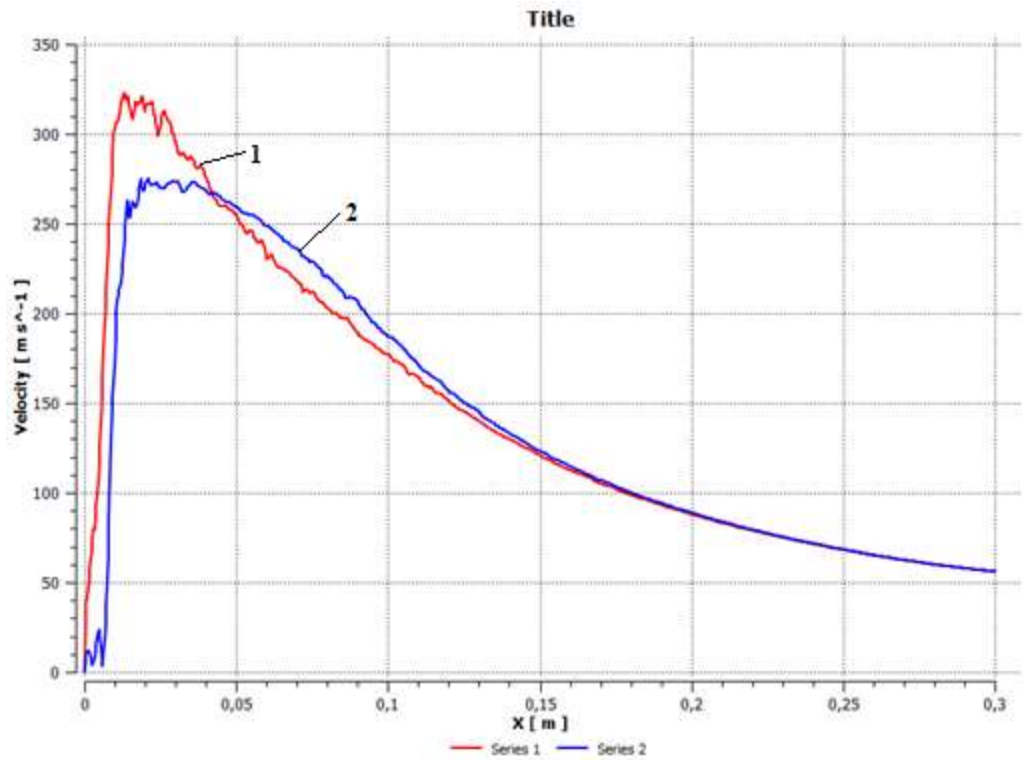


Рисунок Г.5. Изменение скорости струи аргона: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 300°C)

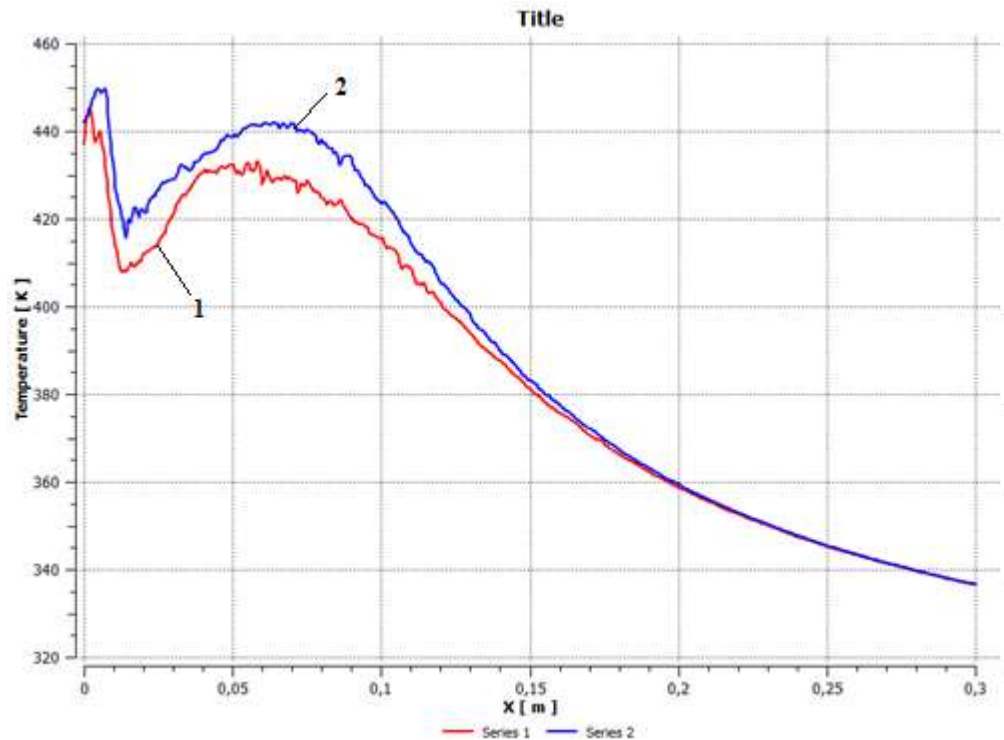


Рисунок Г.6. Изменение температуры аргона в струе: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 300°C)

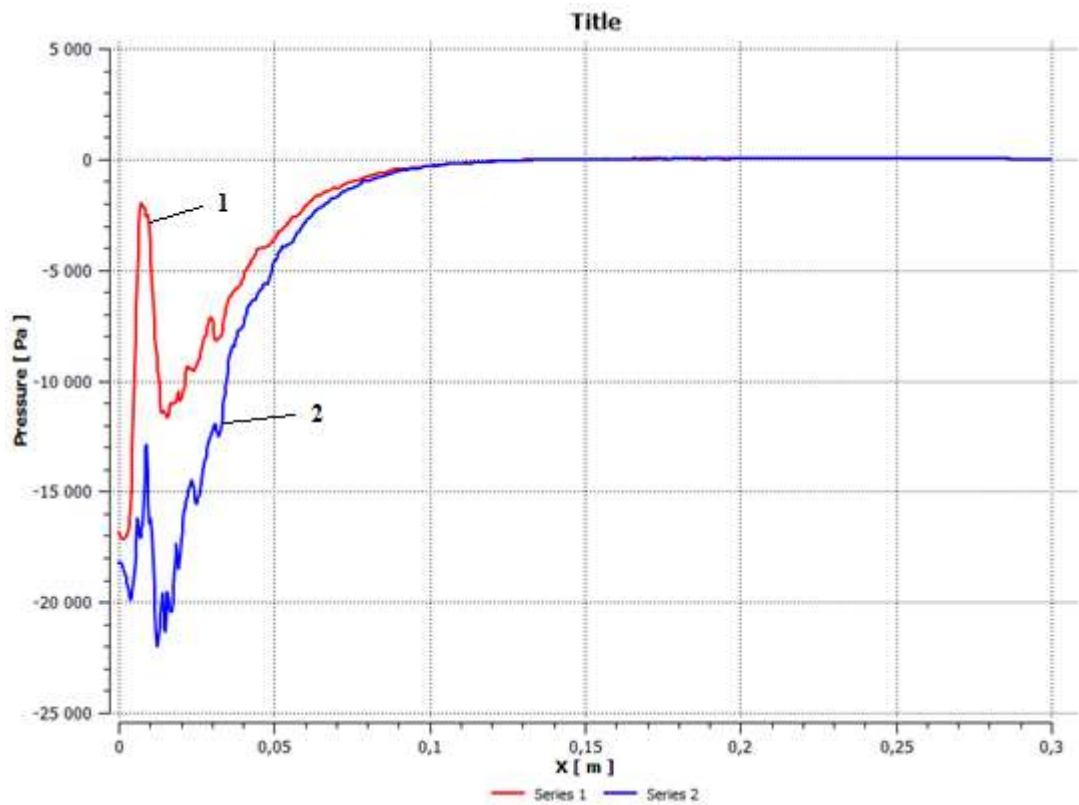


Рисунок Г.7. Изменение давления в струе аргона: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 300°C)

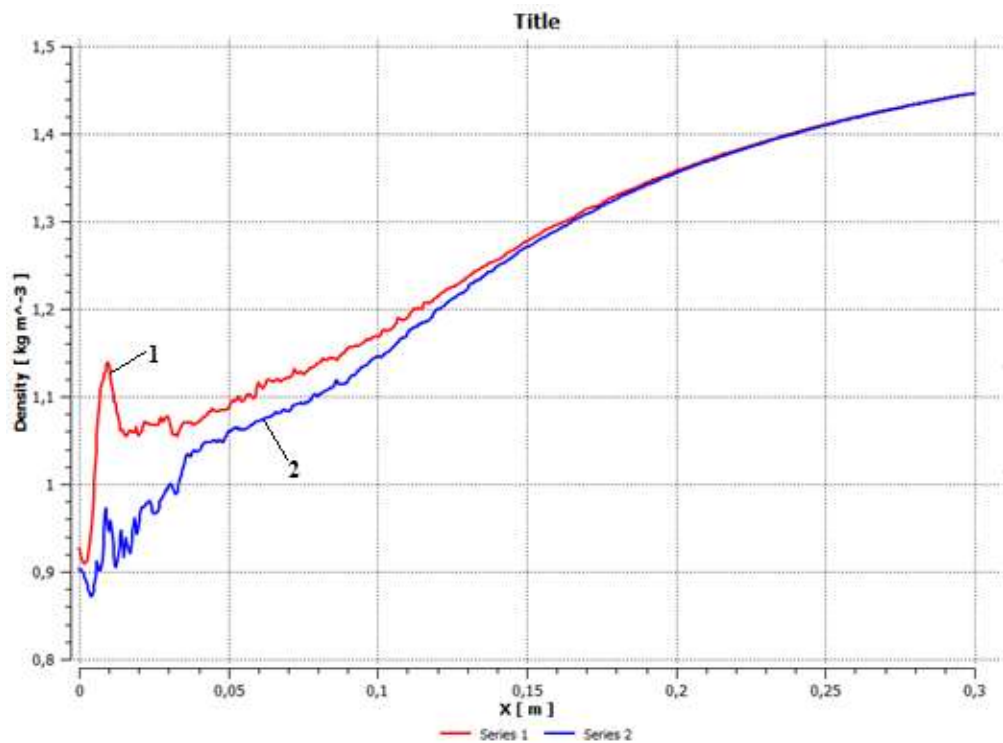


Рисунок Г.8. Изменение плотности аргона в струе: 1 – вдоль оси распылительной форсунки, 2 – вдоль периферийной линии канала подачи расплава (начальная температура газа 300°C)

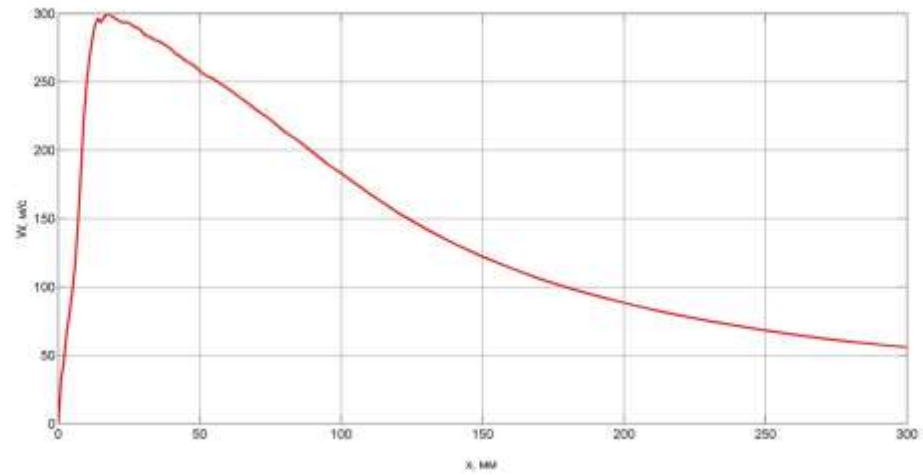


Рисунок Г.9. Изменение средней скорости струи аргона  
(начальная температура газа 300°C)

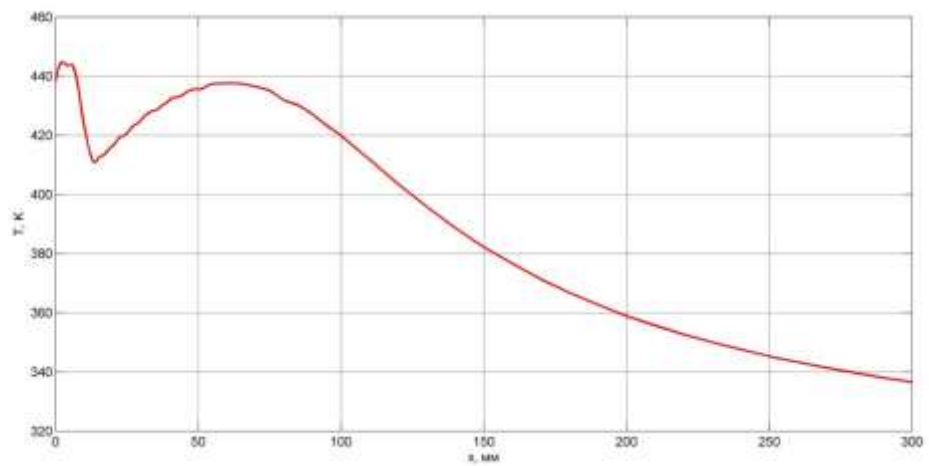


Рисунок Г.10. Изменение средней температуры аргона в струе  
(начальная температура газа 300°C)

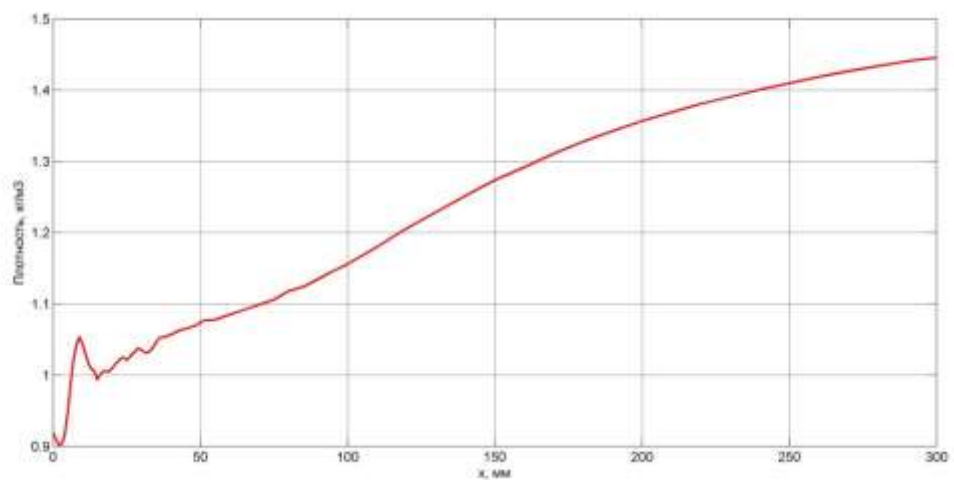


Рисунок Г.11. Изменение средней плотности аргона в струе  
(начальная температура газа 300°C)

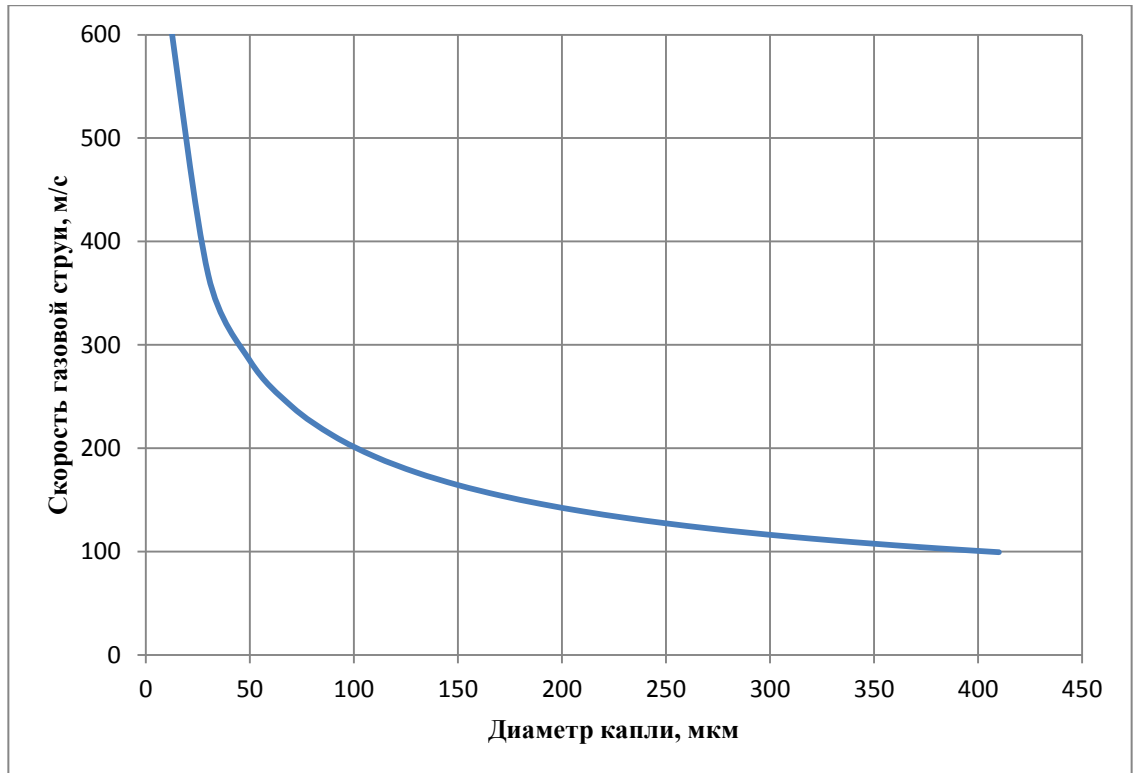


Рисунок Г.12. Критическая скорость струи аргона для дробления капель чугуна различного диаметра (начальная температура газа 300°C)

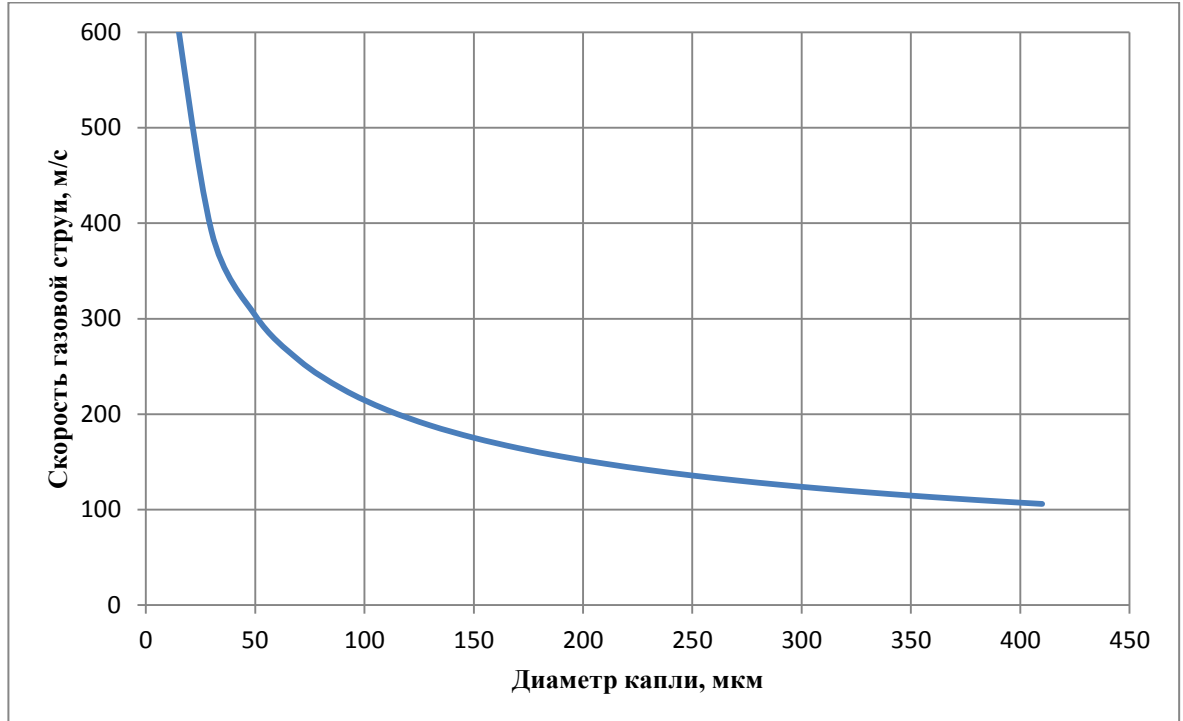


Рисунок Г.13. Критическая скорость струи аргона для дробления капель меди различного диаметра (начальная температура газа 300°C)

## Приложение Д

**Результаты анализа гранулометрического состава порошков, полученных на УРМ-001, при различных сочетаниях температуры жидкого металла на входе в канал подачи ( $T_{вх.}$ ), давления наддува рабочей полости плавильного агрегата ( $P_{над.}$ ) и расстоянием между срезом канала подачи металла и срезом форсунки ( $L$ )**

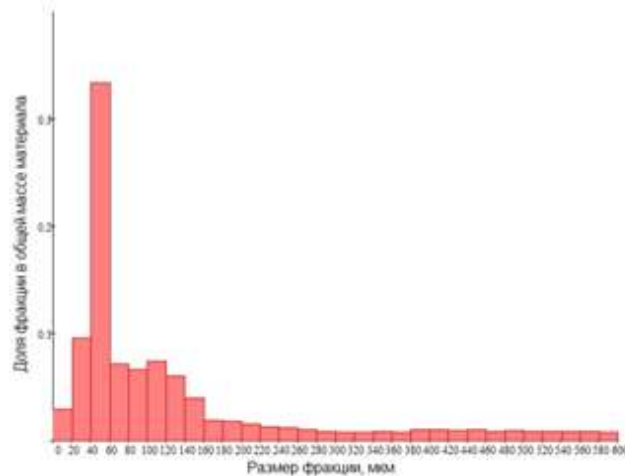


Рисунок Д.1. Результат анализа гранулометрического состава порошка полученного распылением жидкого чугуна в струе воздуха ( $T_{вх.}=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{над.}=1,05\text{ атм.}$ ,  $L=0,005\text{ м}$ )

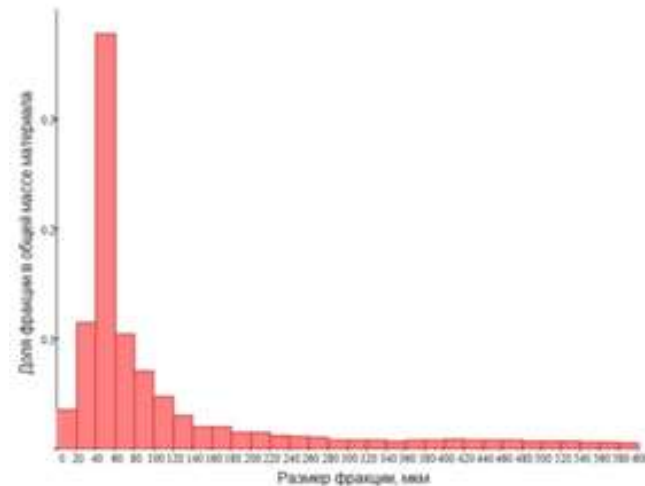


Рисунок Д.2. Результат анализа гранулометрического состава порошка полученного распылением жидкого чугуна в струе воздуха ( $T_{вх.}=1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{над.}=1,05\text{ атм.}$ ,  $L=0,005\text{ м}$ )

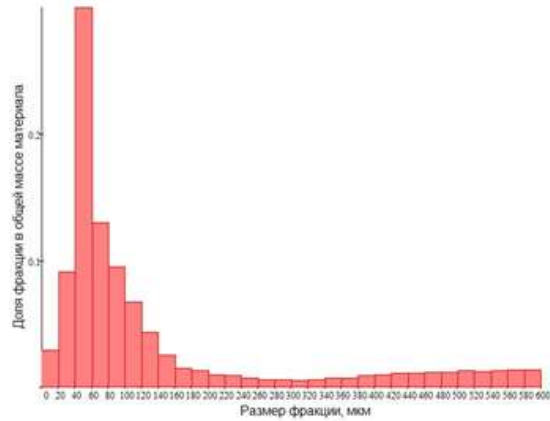


Рисунок Д.3. Результат анализа гранулометрического состава порошка полученного распылением жидкой меди в струе воздуха ( $T_{\text{вх.}}=1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
 $P_{\text{над.}}=1,05\text{ атм.}, L=0,005\text{ м}$ )

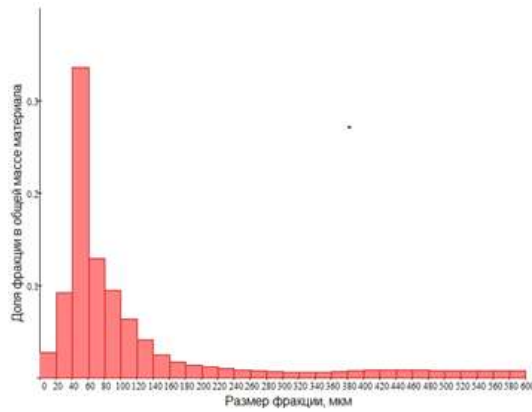


Рисунок Д.4. Результат анализа гранулометрического состава порошка полученного распылением жидкой меди в струе воздуха ( $T_{\text{вх.}}=1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
 $P_{\text{над.}}=1,05\text{ атм.}, L=0,005\text{ м}$ )

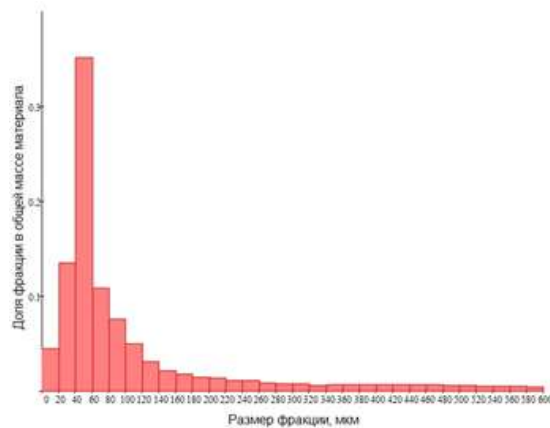


Рисунок Д.5. Результат анализа гранулометрического состава порошка полученного распылением жидкого чугуна в струе воздуха ( $T_{\text{вх.}}=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
 $P_{\text{над.}}=1,05\text{ атм.}, L=0,005\text{ м}$ )

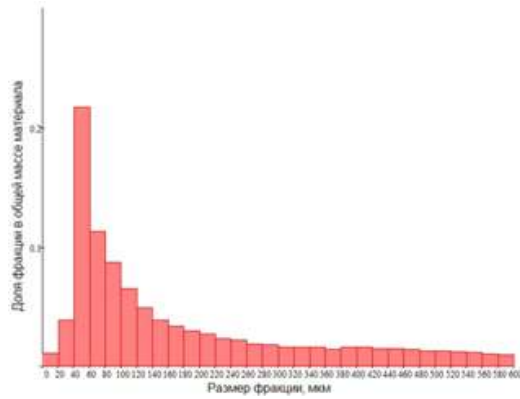


Рисунок Д.6. Результат анализа гранулометрического состава порошка полученного распылением жидкого чугуна в струе воздуха ( $T_{\text{вх.}}=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
 $P_{\text{над.}}=1,17\text{ атм.}, L=0,005\text{ м}$ )

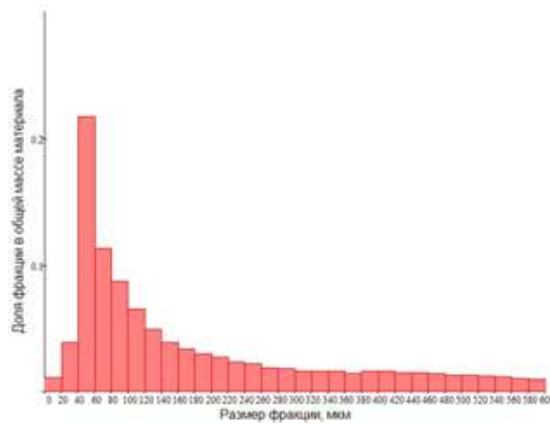


Рисунок Д.7. Результат анализа гранулометрического состава порошка полученного распылением жидкой меди в струе воздуха ( $T_{\text{вх.}}=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
 $P_{\text{над.}}=1,05\text{ атм.}, L=0,005\text{ м}$ )

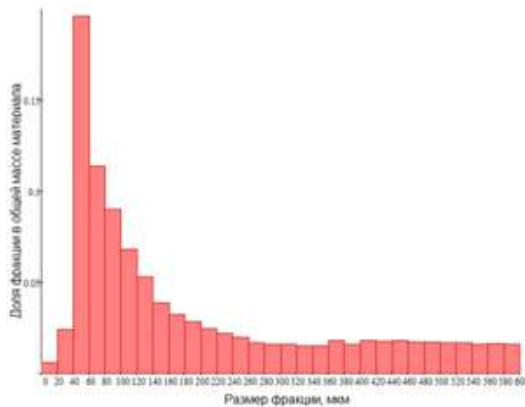


Рисунок Д.8. Результат анализа гранулометрического состава порошка полученного распылением жидкой меди в струе воздуха ( $T_{\text{вх.}}=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
 $P_{\text{над.}}=1,17\text{ атм.}, L=0,005\text{ м}$ )

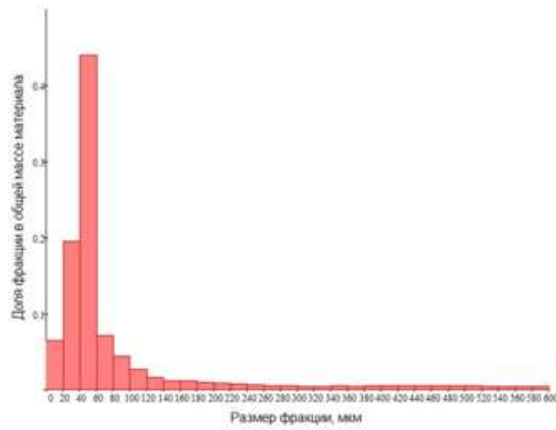


Рисунок Д.9. Результат анализа гранулометрического состава порошка полученного распылением жидкого чугуна в струе воздуха ( $T_{\text{вх.}}=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
 $P_{\text{над.}}=1,05\text{ атм.}, L=0\text{ м}$ )

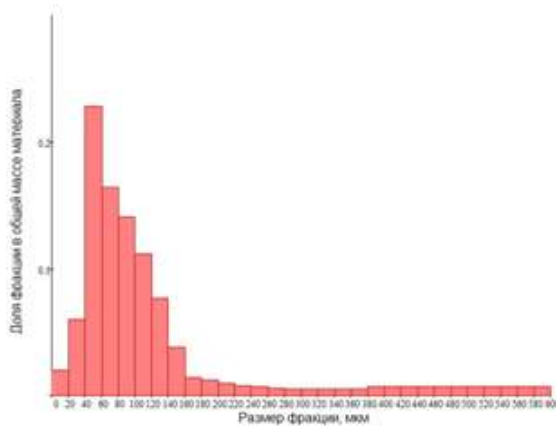


Рисунок Д.10. Результат анализа гранулометрического состава порошка полученного распылением жидкого чугуна в струе воздуха ( $T_{\text{вх.}}=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
 $P_{\text{над.}}=1,05\text{ атм.}, L=0,01\text{ м}$ )

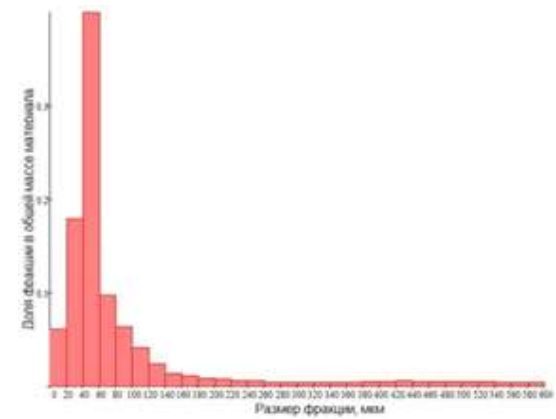


Рисунок Д.11. Результат анализа гранулометрического состава порошка полученного распылением жидкой меди в струе воздуха ( $T_{\text{вх.}}=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
 $P_{\text{над.}}=1,05\text{ атм.}, L=0\text{ м}$ )



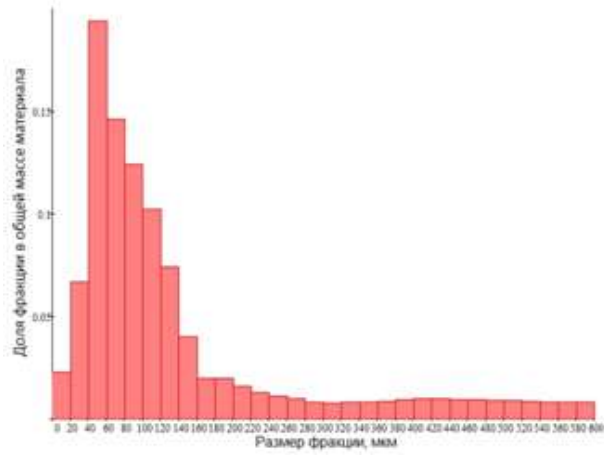


Рисунок Д.12. Результат анализа гранулометрического состава порошка полученного распылением жидкой меди в струе воздуха ( $T_{\text{вх.}}=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
 $P_{\text{над.}}=1,05\text{ атм.}$ ,  $L=0,01\text{ м}$ )

## Установка распыления жидких металлов УРМ-002

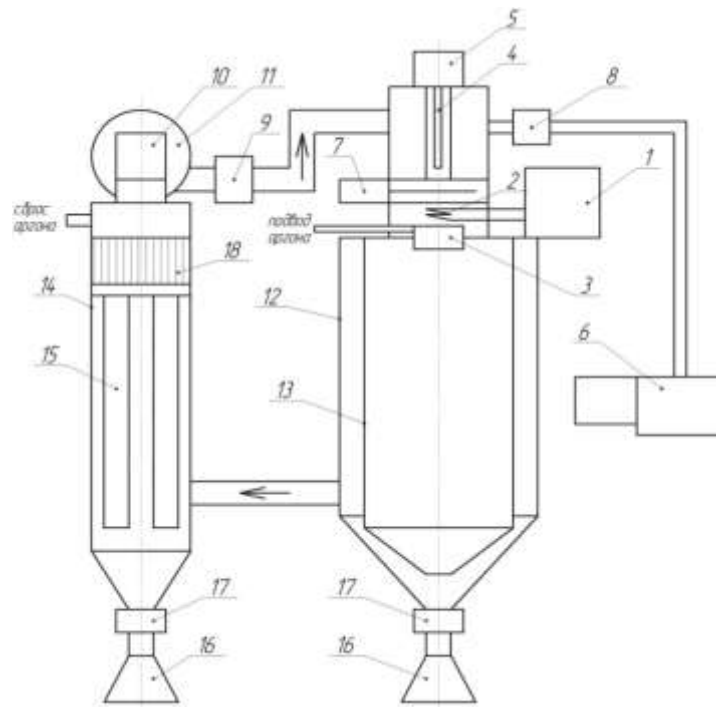


Рисунок Е.1. Схема УРМ-002: 1 – плавильный агрегат, 2 – индуктор, 3 – распылительная форсунка, 4 – заготовка, 5 – привод подачи заготовки, 6 – вакуумный насос, 7 – вакуумный затвор, 8,9,10 – вакуумные клапаны, 11 – циркуляционный вентилятор, 2 – камера распыления, 13 – экран, 14 – фильтровально-охлаждающая камера, 15 – рукавный фильтр, 16 – емкость для сбора порошка, 17 – блок вентиля, 18 – охладитель аргона

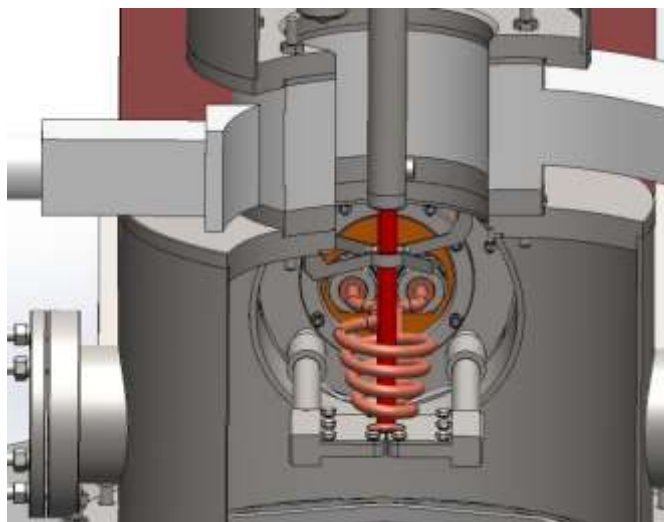


Рисунок Е.2. Распылительный узел установки УРМ-002

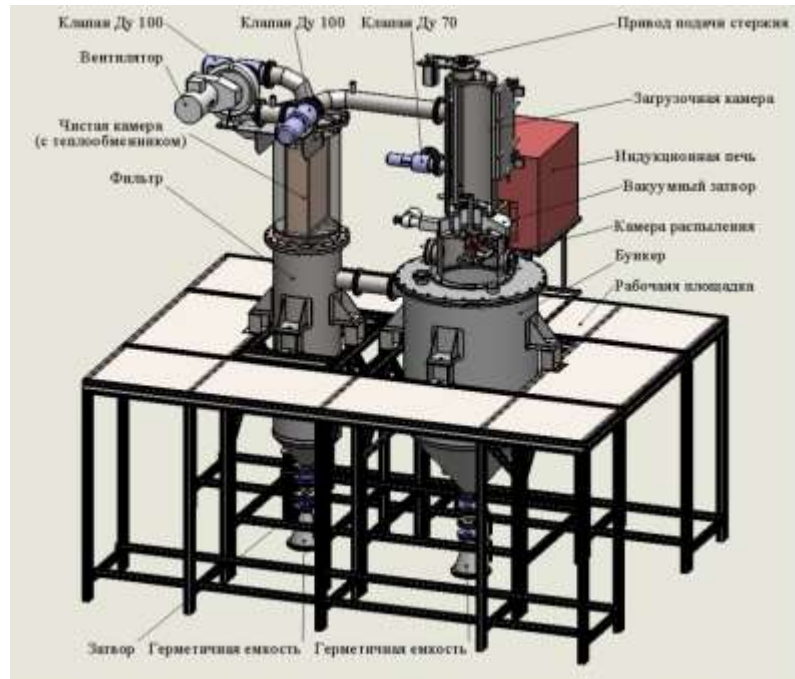


Рисунок Е.3. Модель установки УРМ-002



Рисунок Е.4. УРМ-002