



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Кадыров Арслан Алмазович

Разработка плазменной технологии для получения металлических порошков, используемых в аддитивных технологиях

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Фролов Владимир Яковлевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань

Гайсин Алмаз Фивзатович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории лазерной диагностики плазмы и взаимодействия плазмы с поверхностью федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Самсонов Дмитрий Сергеевич

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «04» февраля 2021 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета У.05.09.10 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главный учебный корпус, аудитория 150.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета У.05.09.10
кандидат технических наук, доцент



Иванов Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Применение аддитивных технологий, в настоящее время, является одним из наиболее актуальных трендов в мировой инженерной индустрии. С помощью инновационной технологии, развивающиеся промышленные компании имеют возможность применять новые методы к проектированию и производству деталей. Они существенно сокращают время, затрачиваемое на последующую обработку и улучшают качество продукции, выпуская детали, форма которых наиболее близка к данным компьютерной модели.

Важной частью аддитивного производства металлических деталей это исходный материал. Существуют разные подходы аддитивного производства, в которых используются разные виды исходных материалов, и наиболее популярные технологии, такие как селективное лазерное спекание или электронно-лучевое плавление и наплавка технология - используют исходный материал в порошкообразной форме.

Несмотря на то, что данное направление является крайне перспективным, на данный момент на территории России оно находится пока что в зачаточной стадии и по сравнению с ведущими странами, отставание крайне значительно. Так, по оценкам мировых аналитических компаний, на долю нашей страны приходится лишь 1-2% рынка аддитивных технологий. Однако данное отставание хоть и существенно, но в последние годы лидеры российского бизнеса в области производства начали также активно проявлять интерес к данной тематике и внедрять его на своих предприятиях. Основные проблемы, которые были отмечены при внедрении АП (аддитивного производства) в России, перечислены ниже:

- отсутствие конкурентоспособного отечественного 3D-оборудования,
- низкие масштабы применения АП на существующих мощностях,
- дороговизна и малый ассортимент порошковой продукции и расходных материалов.

Закупка порошков и расходных материалов для АП и оборудования осуществляется в первую очередь у иностранных производителей. Однако необходимо отметить, что и в России есть свои лидеры и новаторы в данной области, крупнейшими потребителями порошковых материалов на российском рынке являются такие компании как: ПАО «Авиадвигатель»,

ПАО «НПО «Сатурн», ЗАО «Новомет-Пермь», а компании ГК «Росатом» и «Роскосмос» - работают по развитию и продвижению аддитивных технологий.

Основными лидерами в области производства металлических порошков на территории России являются следующие промышленные компания: ОАО «Сулинский металлургический завод», ОАО «Северсталь», ОАО «Полема» (г. Тула), ЗАО «Инвест-технологии» (г. Москва). Но далеко не весь ассортимент продукции, выпускаемый этими предприятиями, подходит по параметрам для использования в 3D-печати.

В связи с ростом интереса в развитии аддитивных технологий на территории России как со стороны бизнеса, так и со стороны правительства РФ, на базе ВШЭС было решено инициировать проект по модернизации технологии получения металлических порошков при помощи многоструйного плазмотрона. Актуальность работы связана с дороговизной металлических порошков зарубежного производства и тем самым востребованностью металлических порошков надлежащего качества и широкого сортамента отечественных производителей, для поставки на предприятия, занимающихся производством деталей при помощи АП.

ВШЭС в составе СПбПУ, ныне возглавляемая Зверевым С.Г. и при поддержке доктора технических наук, профессора Фролова В.Я. продолжает проводить исследования и научные эксперименты в области высокотехнологического, плазменного оборудования. Еще начиная с середины 20-ого века, школа занимается разработкой электротехнологических установок и изучением плазмотермических процессов под руководством таких ученых как Донской А.В., Клубникин В.С., Дресвин С.В. Комплексный метод исследования плазменных и электротехнических процессов в ВШЭС, позволяет объединить в себе как теоретические исследования, включающие в себя разработку математических моделей, так и их верификацию на базе экспериментальных установок и стендов.

Объектом исследования является плазменная установка переменного тока с двумя плазмотронами для диспергирования металлических порошков.

Предметом исследования являются физические процессы в плазменной установке с двумя плазмотронами, рассматриваемые в нестационарной математической модели; работа двух плазмотронов в газовой среде; процесс расплавления металлической заготовки путем обработки

плазменной струей переменного тока и анализ получаемого конечного продукта.

Цель работы. Разработка плазменной технологии для получения металлических порошков, используемых в аддитивных технологиях, путем распыления вращающегося электрода в потоке плазмы многоструйного плазмотрона переменного тока.

Достижение поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ физических процессов, протекающих во время поджига и горения электрической дуги переменного тока в двухструйном плазмотроне.

2. Установить взаимосвязи между тепловыми, газодинамическими и электромагнитными параметрами плазмотронов и характеристиками формируемых частиц под воздействием двухструйного плазменного потока в технологической камере заполненной смесью газов.

3. Разработать нестационарную математическую модель дугового плазмотрона переменного тока с двумя электродами и вращающейся расплавляемой заготовкой и вычисление энергетических характеристик, необходимых для передачи от плазменной дуги на деталь.

4. Разработать нестационарную математическую модель процесса расплавления заготовки и получения металлических частиц под воздействием плазменной дуги переменного тока.

5. Создать экспериментальный стенд для получения металлического порошка при помощи плазменной установки переменного тока.

6. Провести экспериментальные исследования по получению металлического порошка на базе разработанного оборудования и проанализировать полученный материал.

Методы исследования. Теоретические исследования основаны на разработке нестационарных математических моделей дугового плазмотрона для нанесения покрытий, осуществления численного моделирования в программном обеспечении Comsol Multiphysics, основанном на использовании метода конечных элементов и анализе полученных результатов. Экспериментальные исследования режимов работы дугового плазмотрона, регистрация данных во времени об основных характеристиках плазмотрона с использованием АЦП при работе от различных источников

питания, анализ полученных результатов. Сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна

1. Разработаны нестационарные математические модели дугового плазмотрона для получения металлических порошков в программном продукте Comsol Multiphysics.

2. Разработана трехмерная нестационарная математическая модель камеры для получения металлического порошка, рассчитаны траектории движения частиц и скорость движения в программном продукте Comsol Multiphysics.

3. Разработана математическая модель теплообменных процессов у поверхности распыляемого электрода в турбулентном течении газа.

4. Разработана экспериментальная установка для получения металлического порошка методом центробежного распыления электрода с использованием нескольких плазмотронов переменного тока.

Теоретическая значимость диссертации заключается в разработке: математических моделей двухструйного плазмотрона, позволяющих минимизировать экспериментальные исследования при разработке новых конструкций плазмотронов, обеспечивающих большую производительность при получении металлических порошков;

требований к конструкционным особенностям и режимам работы двухструйного плазмотрона, для обеспечения стабильности плазменного потока и эффективного теплоотведения от узлов плазмотрона для повышения эксплуатационного ресурса.

Практическая значимость работы заключается в применении результатов при создании новых и модернизации существующих установок для получения металлических порошков с целью повышения эффективности их производства и увеличения эксплуатационного ресурса применяемого оборудования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа, устанавливающие взаимосвязь параметров плазменной установки переменного тока и образование металлических частиц.

2. Нестационарные математические модели, описывающие процесс получения металлических частиц, при помощи плазменной электротехнологии переменного тока в программном продукте Comsol Multiphysics.
3. Методика проведения экспериментальных исследований, на основе разработанной экспериментальной установки и анализ полученных результатов.
4. Разработка конструкции плазменной установки для получения мелкодисперсного порошка, увеличивающая срок службы катода плазмотрона переменного тока.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на следующих научных конференциях:

1. VII Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020» 23-24 апреля 2020 г.

2. Международная конференция «2020 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference» (Россия, Санкт-Петербург, 2020).

3. Международная конференция «2019 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference» (Россия, Санкт-Петербург, 2019).

4. 14-я Международная конференция «Плёнки и покрытия - 2019» (Россия, Санкт-Петербург, 2019).

5. International Scientific Electric Power Conference 23–24 May 2019, Saint Petersburg, Russian Federation

6. XLVII Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Россия, Санкт-Петербург, 2018).

7. XLVI Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Россия, Санкт-Петербург, 2017).

8. 13-я Международная конференция «Плёнки и покрытия - 2017» (Россия, Санкт-Петербург, 2017).

Публикации. Результаты и выводы, полученные в ходе работы над кандидатской диссертацией, были представлены и опубликованы в 9

сборниках и периодических изданиях, 6 из которых включены в перечень WoS, Scopus и ВАК.

Личный вклад. Кадыров А.А. в течение работы над кандидатской диссертацией, лично участвовал в постановке рассматриваемых задач, расчете и создании нестационарных математических моделей плазмотрона переменного тока с вращающимся электродом, в разработке методики экспериментального исследования и совместное участие с преподавателями кафедры в создании плазменной установки для диспергирования металлических частиц, а также формировании выводов по проведенной работе.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 61 наименование и приложения. Полный объем диссертации – 92 страницы, в том числе рисунков – 50, таблиц – 11.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность проделанной работы, цель и задачи диссертационной работы, методы исследования, проведенные в ходе написания кандидатской диссертации, научная новизна и краткое состояние проблем исследования дуговых плазмотронов, используемых в технологии производства металлических порошков.

В первой главе освещается общее понимание аддитивного производства, основные компании-производители и потребители данной продукции. Как показало исследование, лидерами по внедрению в производство аддитивных технологий являются такие страны, как США, Китай, Южная Корея, Япония, Германия и Великобритания (Рисунок 1). Описывается рынок сбыта и темпы роста мирового внедрения данной технологии, объясняющие актуальность данного исследования.

Описываются более детально различные виды технологий, по производству металлических порошков, такие как механический способ, диспергирование расплавов, распыление металла, восстановление химических соединений. Выделяются их слабые и сильные стороны и сравниваются с технологией, представленной в кандидатской диссертации.

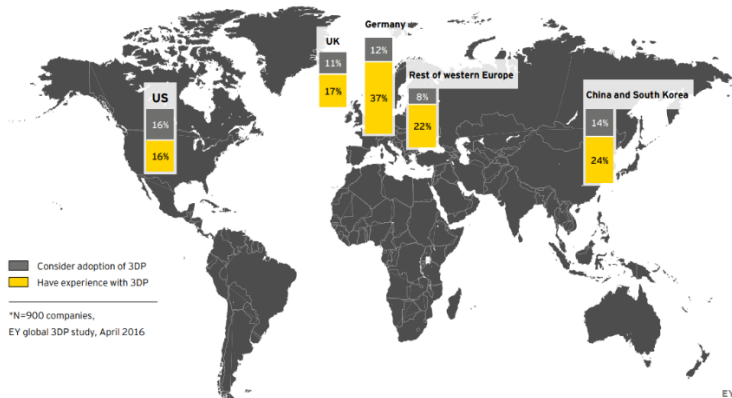


Рисунок 1. Основные центры по использованию и производству аддитивных технологий

Приведенный в первой главе литературный обзор, существующих методик получения металлических порошков, показал, что на сегодняшний день данная отрасль получила достаточно широкое распространение, а так же стремительно развивается с целью получения более эффективных методик. Рассмотренные примеры свидетельствуют об актуальности исследуемой тематики, а также заинтересованности промышленных компаний к современным и более эффективным способам получения металлических порошков.

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

1. Провести анализ физических процессов, протекающих во время поджига и горения электрической дуги переменного тока в двухструйном плазмотроне.
2. Установить взаимосвязи между тепловыми, газодинамическими и электромагнитными параметрами плазмотронов и характеристиками формируемых частиц под воздействием двухструйного плазменного потока в технологической камере заполненной смесью газов.
3. Разработать нестационарную математическую модель дугового плазмотрона переменного тока с двумя электродами и вращающейся 30 расплавляемой заготовкой и вычисление

энергетических характеристик, необходимых для передачи от плазменной дуги на деталь.

4. Разработать нестационарную математическую модель процесса расплавления заготовки и получения металлических частиц под воздействием плазменной дуги переменного тока.
5. Создать экспериментальный стенд для получения металлического порошка при помощи плазменной установки переменного тока.
6. Провести экспериментальные исследования по получению металлического порошка на базе разработанного оборудования и проанализировать полученный материал.

Во второй главе представлены основные теоретические исследования и результаты математического моделирования в области термических, газодинамических и электромагнитных задач в таких программах как Comsol Multiphysics и Mathcad.

В первую очередь решалась задача, по выбору плазмообразующего и технического газа, для заполнения рабочей камеры плазменной установки. Для описания равновесия среды, обычно используют уравнения, которые базируются на двух законах: первый на законе действующих масс, а второй на нахождении минимума термодинамического потенциала силы. Для расчета свойств плазмы использовались табличные данные из базы NIST и формулы, представленные в тексте диссертации.

Получение термодинамических свойств плазмы осуществляется при помощи следующих закономерностей: для определения плотности, теплоемкости и теплопроводности плазмы используются (формулы 1-4), полученные температурные зависимости плазмы изображены на (рисунках 2-4)

$$\rho = \sum_i m_i n_i = \frac{1}{N_A} \sum_i M_i n_i \quad (1)$$

Плотность плазмы

где M – молярная масса, n – концентрация компонентов плазмы;

$$c_p = \frac{dh_{пл}}{dT} \quad (2)$$

Теплоемкость плазмы при постоянном давлении

где h – энтальпия плазмы;

Теплопроводность плазмы состоит из четырех частей: теплопроводности λ_h тяжелых частиц, теплопроводности электронов λ_e , теплопроводности реакции $\lambda_{\text{ри}}$ и внутренней теплопроводности λ_{int} .

Для расчета теплопроводности тяжелых частиц применяется теория Чепмена-Энскога во втором приближении.

$$\lambda_h = -\frac{75k}{8} (2\pi kT)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\begin{vmatrix} q_{ij} & n_i \\ n_j & 0 \end{vmatrix}}{m_j^{\frac{1}{2}} |q_{ij}^{11}|} \quad (3)$$

где q_{ij} - квадратная матрица, состоящая из элементов q_{ij}^{11} , зависящих от числовой плотности и приведенных интегралов столкновений, k – коэффициент Больцмана, .

Во втором приближении теории Чепмена-Энскога теплопроводность электронов определяется формулой

$$\lambda_e = \frac{75k}{8} n_e^2 k \left(\frac{2\pi kT}{m_e}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\begin{vmatrix} 1 & q_1^{12} \\ 0 & q_1^{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} q_1^{11} & q_1^{12} \\ q_1^{21} & q_1^{22} \end{vmatrix}} \quad (4)$$

где коэффициенты q зависят от числовых плотностей и приведенных интегралов столкновений.

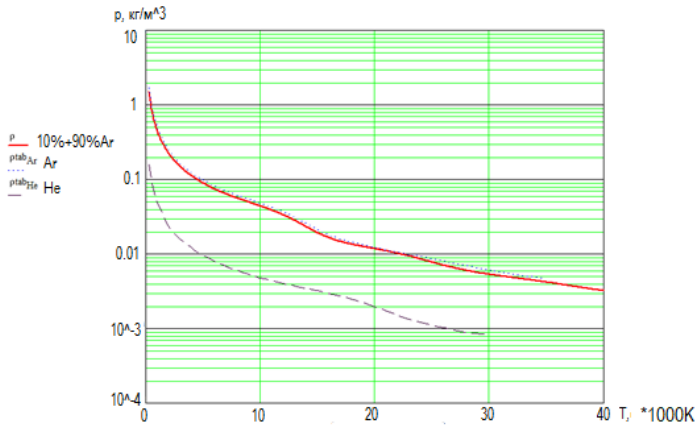


Рисунок 2. График распределения плотности плазмы Ar+(He-10%), Ar, He

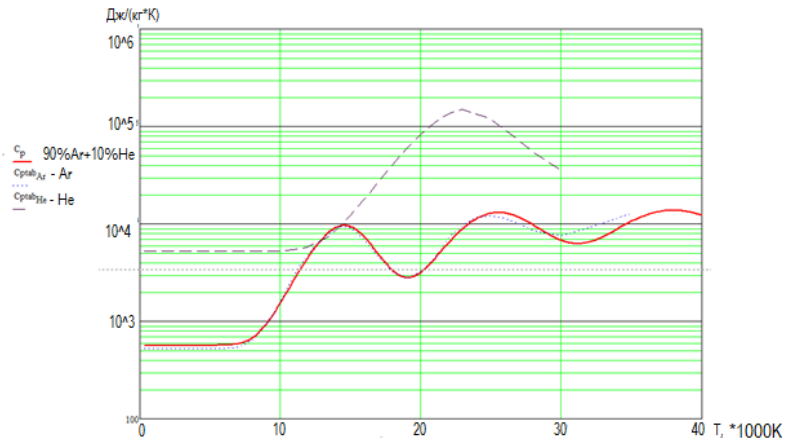


Рисунок 3. График распределения теплоемкости плазмы Ar+(He-10%), Ar, He

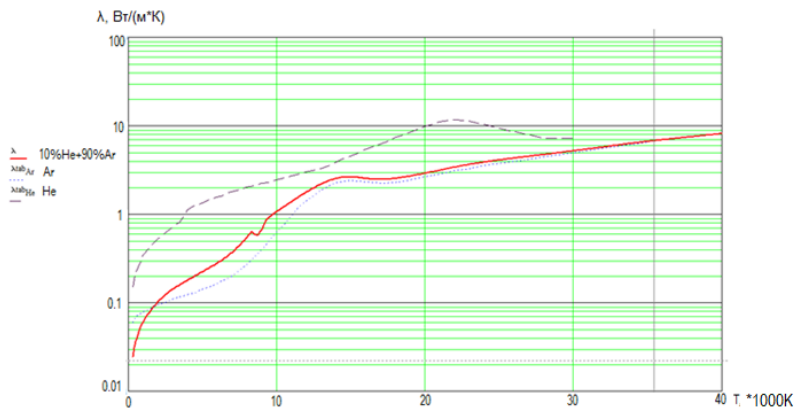


Рисунок 4. График распределения теплопроводности плазмы Ar+(He-10%), Ar, He

Применив вышеуказанные условия, были получены зависимости для аргона, гелия и их смеси. Плазмообразующим газом был выбран аргон, т.к. благодаря своей большой атомной массе 39,948 а.е.м. и плотности (Рисунок 2) эффективно выталкивает расплав из анодного пятна. Это связано с тем, что достигается большая кинетическая энергия струи плазмы, а исходя из того, что аргон имеет малый потенциал ионизации он превосходно подходит для зажигания плазменной дуги. Однако помимо расплавления металлической заготовки в процессе получения металлических порошков необходимо максимально ускорить процесс кристаллизации, разбрызгиваемых металлических капель, для этой цели объем камеры заполняется газовой смесью состоящей из аргона и гелия, нейтральных газов по отношению к металлам. Гелий добавляется в смесь по той причине, что характеризуется крайне большой теплопроводностью, ускоряющую затвердевание жидких капель металла и, тем самым упрощает конструкцию плазменной установки. Из этого следует, что состав плазменной струи будет по большей части состоять из аргона с небольшим добавлением гелия.

В качестве теоретического исследования плазменной дуги, были созданы осесимметричные двумерные математические модели, при помощи основных законов и уравнений: уравнение движения (УД), дополненное уравнением неразрывности (УН);

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \vec{F} + \nabla \cdot \left[-pI + \mu(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (7)$$

Уравнение баланса энергии (УБЭ):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{v} \cdot \nabla T - \lambda \nabla T = Q_s - Q_{rad} \quad (8)$$

где T – температура плазмы; ρ – плотность плазмы, зависящая от температуры (рисунок 2); C_p – теплоемкость плазмы, зависящая от температуры (рисунок 3); v – скорость потока плазмы; λ – теплопроводность плазмы, зависящая от температуры (рисунок 4); Q_s – функция источника; Q_{rad} – удельная мощность излучения, зависящая от температуры. Функция источника Q_s определяет удельную мощность Джоулевого нагрева, согласно выражению (9).

$$Q_s = \sigma E^2 \quad (9)$$

Расчет электромагнитного поля осуществляется с использованием системы уравнений Максвелла, закона Гаусса и закона Ома:

$$\begin{cases} \nabla \vec{D} = \rho \\ \nabla \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \end{cases} \quad (10)$$

Для конечного получения картины работы плазматрона были использованы рабочие характеристики плазменной установки и выбраны для дальнейшего использования наилучшие результаты. Так при расходе газа $G=0.3$ г/с, частоты $f=50$ Гц и времени работы плазматрона $t=1$ с. была получена следующая картина см. на рисунке 5а.

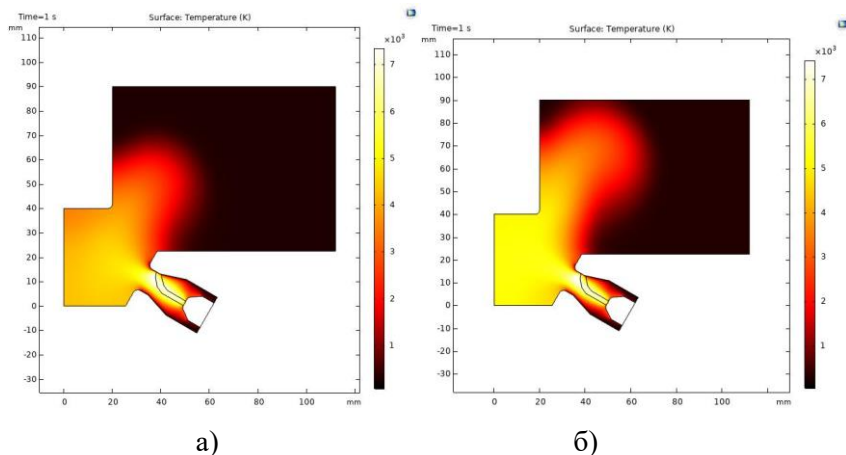


Рисунок 5. Распределение температуры а) $G=0,3$ г/с, $f=50$ Гц, $t=1$ с., б) $G=0,5$ г/с, $f=50$ Гц, $t=1$ с.

При увеличении расхода газа до $G=0,5$ г/с распределение температуры в плазменном потоке изменяется следующим образом рис. 5б.

Помимо зависимости от расхода газа был проанализирован рабочий процесс при различных рабочих частотах плазматрона. В данном случае рассматривались частоты в 50 Гц и 10000 Гц. Результат исследования показал, что работа при повышенных частотах дает более стабильную работу плазменной установки, что так же сказывается на качестве и производительность металлического порошка. Для частоты $f=10000$ Гц результат моделирования представлен на рисунке 6, а для частоты $f=50$ Гц см рисунок 7.

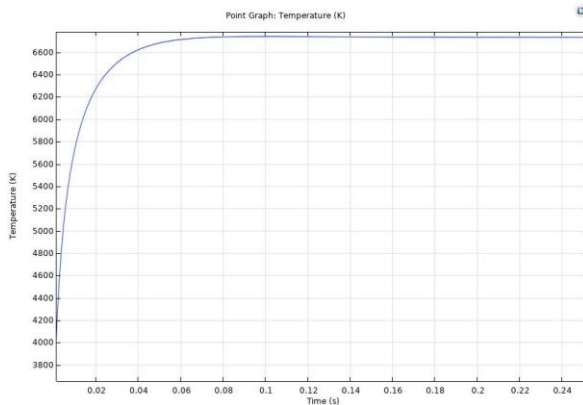


Рисунок 6. Временная зависимость температуры в межэлектродном промежутке $f=10000\text{Hz}$

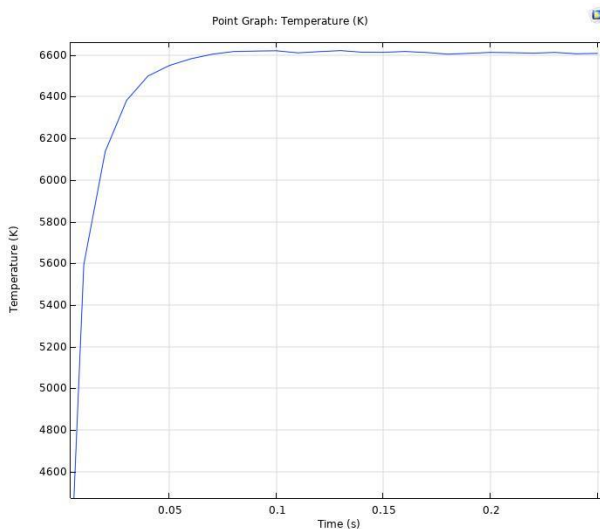


Рисунок 7. Временная зависимость температуры в межэлектродном промежутке $f=50\text{Hz}$

При этом на рисунке 8 представлена осциллограмма тока и дуги плазматрона для расплавления металла. Напряжение, как видно из рисунка, имеет форму, отличную от формы тока. В начале полупериода оно быстро возрастает и достигает максимального значения u_3 – напряжение зажигания

дуги, после чего напряжение падает до значения u_d – минимальное напряжение дуги и к концу полупериода напряжение возрастает до значения u_{II} – напряжения потухания дуги.

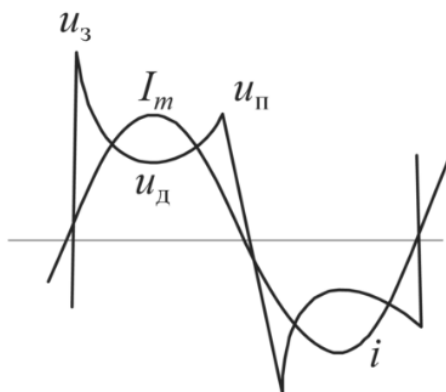


Рисунок 8. Зависимость напряжения и тока дуги переменного тока

Рассчитанные значения состава плазмообразующего газа, температуры и мощности помогут нам в расчете данной задачи. Фронт плавления представляет собой вертикальную линию, показанную на рисунке 9, в представленном расчете используется допущение пониженного давления для повышения точности сил плавучести, поскольку они относительно малы по сравнению с другими членами в балансе импульса. По мере того как металл плавится, поверхность раздела твердое тело – жидкость движется в направлении твердой стороны. Баланс энергии на этом фронте выражается как:

$$\rho_0 \Delta H v \cdot n = (\Phi_1 - \Phi_s) \cdot n \quad (11)$$

где расплавленный металл представляет собой титан ΔH - скрытая теплота плавления, равная 60 кДж / кг, v (м / с) - вектор скорости фронта, n - вектор нормали на фронте, а Φ_1 и Φ_s (Вт / м²). - тепловые потоки, приходящие с жидкостной и твердой сторон соответственно рисунок 9.

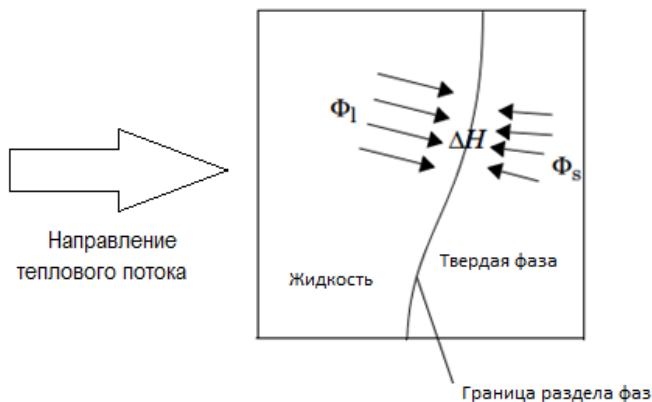


Рисунок 9. Распределения теплового потока в металле

По итогу моделирования получаем зависимость распределения жидкого металла в зоне расчета (рисунок 10) на первом рисунке представлена модель расплавляемой детали в первую секунду воздействия на нее плазменным потоком, а на второй уже после 30 секунд работы плазмотрона, где жидкая фаза металла увеличилась путем плавления.

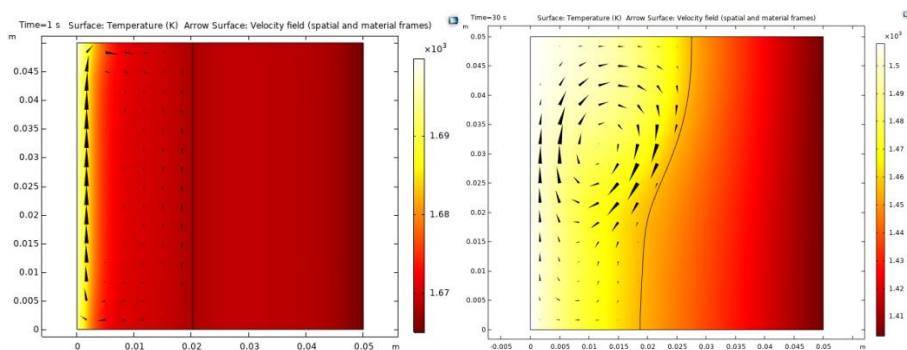


Рисунок 10. Расплавление титана под воздействием плазменного потока.

Объединив предыдущие 2 модели, мы получим общую картину работы плазменной установки, представленную на рисунке 11, где в зависимости от времени можно наблюдать движение расплавленного металла в заготовке и скорость плавления, что в свою очередь можно выразить в производительность. Учитывая сколько материала было расплавлено за минуту, перевести этот объем в полученный металлический порошок.

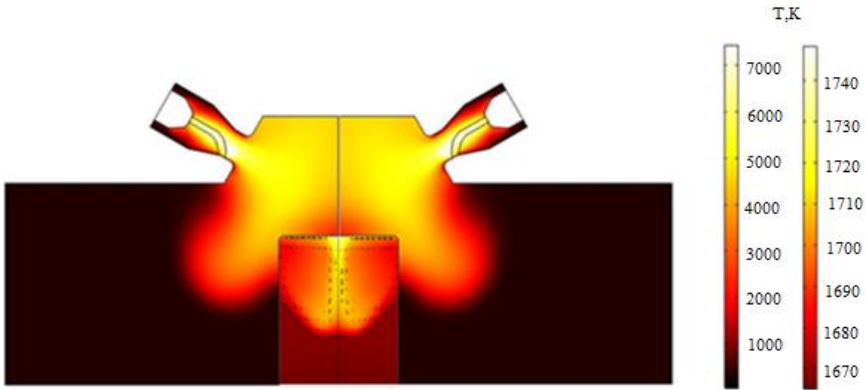


Рисунок 11. Распределение температуры в плазменной дуге и металлической заготовке

Результатом моделирования охлаждения металлической частицы в камере представлены на рисунке 12 (а,б) для аргона и рисунке 13(а,б) для гелия, а так же временные зависимости на рисунках 14(а,б).

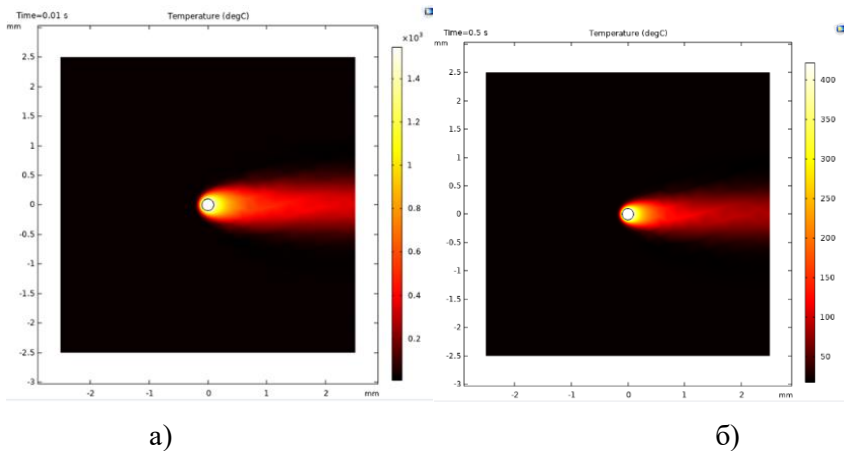


Рисунок 12. Картина охлаждения частицы в зависимости от времени в аргоне а) для $t=0,01$ с б) $t=0,5$ с

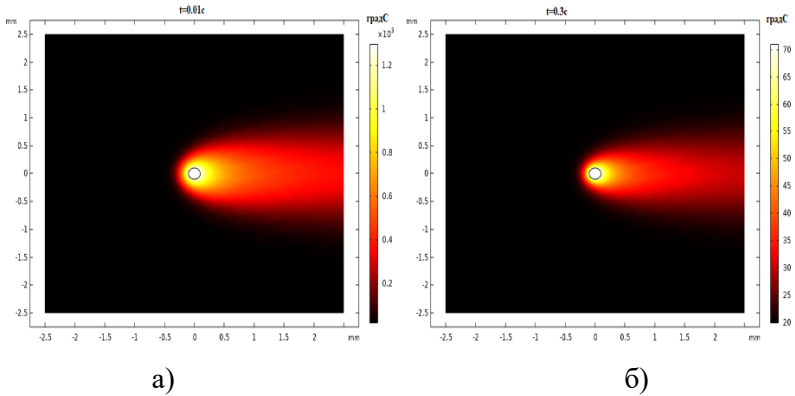


Рисунок 13. Картина охлаждения частицы в зависимости от времени в гелии а) для $t=0,01\text{c}$ б) $t=0,3\text{c}$

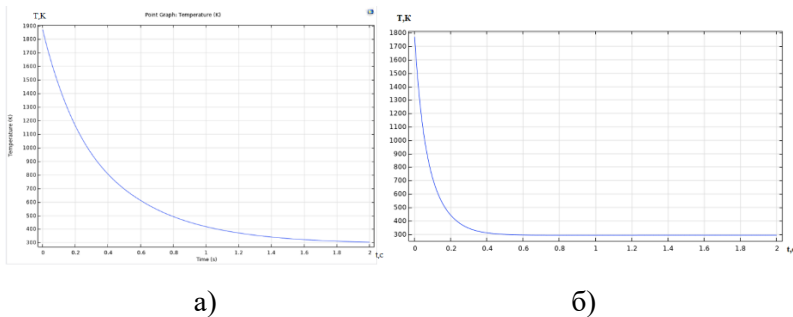


Рисунок 14. График зависимости температуры частицы от времени в а) аргоне, б) гелии

По результатам математического моделирования охлаждения частицы, можно сделать явный вывод, что газовая среда с преобладанием гелия является наилучшим вариантом для заполнения технологической камеры, служащей для охлаждения и сбора получаемого металлического порошка, т.к. в ней охлаждение проходит в 4 раза быстрее чем в чистом аргоне.

Зная значения скорости движения частицы и время ее охлаждения, можно рассчитать диаметр технологической камеры. Если взять время охлаждения 0.3c и скорость движения 5м/с , то диаметр камеры будет приблизительно равна 1.5 метрам.

В третьей главе приведено устройство плазменной установки, ее основные рабочие и технологические элементы, описаны основные технические характеристики плазмотрона, электрического двигателя и источника питания, а также измерительных приборов. Принципиальная блок-схема плазменной установки представлена на рис. 15.

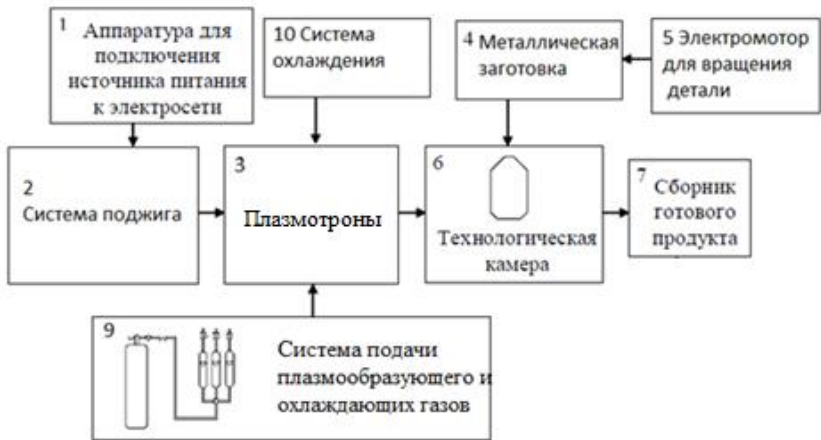


Рисунок 15. Блок-схема плазменной установки

После описания оборудования идет подробный анализ методики проведения эксперимента, целью которого является получение металлического порошка из цельного прутка $d=50\text{мм}$. Представлены изображения процесса распыления металлической заготовки см. рис. 16 и конечный продукт, полученный в ходе эксперимента рис. 17.



Рисунок 16. Процесс распыления плазменной заготовки

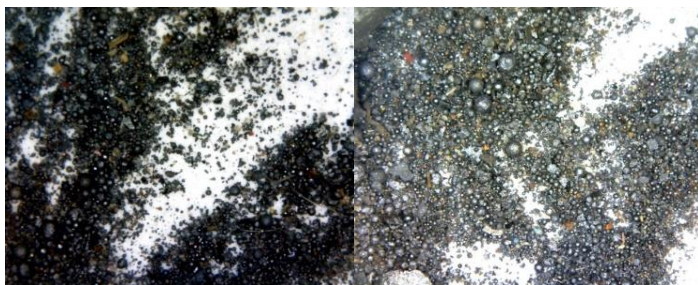


Рисунок 17. Макроструктура фракций порошка из стали

Для более точного исследования полученных образцов было применено исследование при помощи автоэмиссионного электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU, позволяющего не только определить размер гранулы и их форму, но и до сотой процента определить химический анализ полученного порошка. Таким образом, на рисунке 18 представлены порошки размером 40мкм сферической формы, однако среди них попадаются и угловатые обломки, что было освещено ранее.

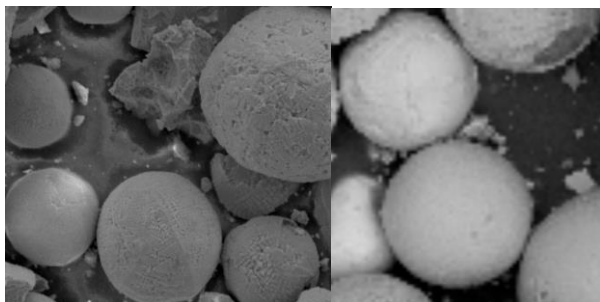


Рисунок 18. Результаты микросъемки стального порошка с масштабом 1x1000

По результатам проведения экспериментальных исследований был получен большой объем данных:

- характеристики тока и напряжения на электрической дуге;
- зависимость работы плазменной установки от изменения расхода газа и сопротивления;
- получены образцы металлического порошка, из чего был сделан вывод по производительности и качеству получаемой продукции.

Изменения, внесенные в плазматрон ПН-ПА1 в ходе исследований, привнесли надежность в установку, так и в качество получаемого порошка.

- изменение длины сопла плазматрона привело к увеличению стабильности горения дуги, что позволило изменять расход газа от 0,1 до 1,5 г/с и увеличить тем самым рабочий диапазон плазменной установки;
- замена компонентов прикадотной области заметно увеличило срок службы данной конструкции.

В четвертой главе представлен сравнительный анализ основных результатов математического моделирования и экспериментального исследования.

Производилось сравнение теоретических значений осциллограмм см. рис.20 с полученными в ходе проведения эксперимента при расходе газа 0,5 г/с см. рис. 19.

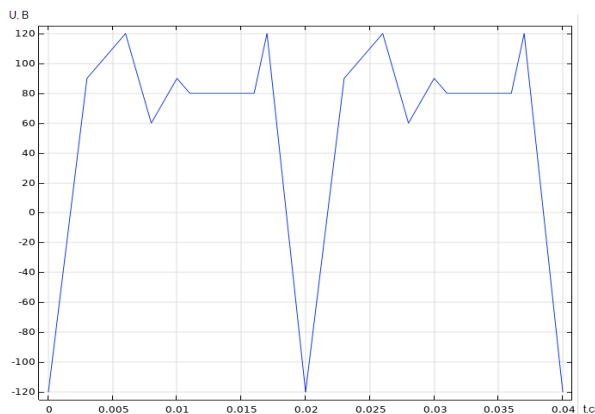


Рисунок 19. Осциллограмма напряжения (экспериментальные данные)

Где ВАХ экспериментальной установки имеет определенные различия с теоретическими данными, однако основной характер напряжения и тока близок к ним, что говорит о корректной настройке и эксплуатации создаваемой установки.

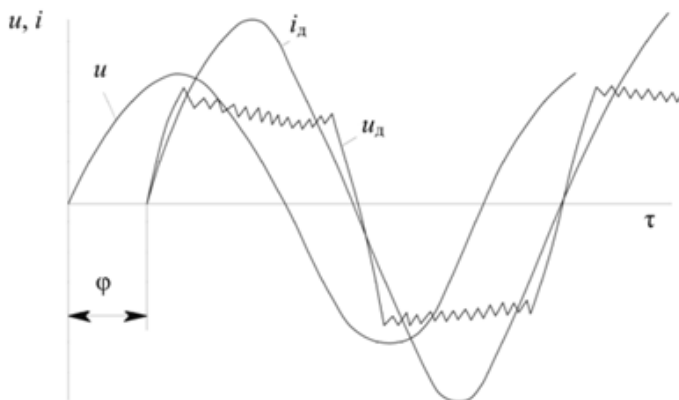


Рисунок 20. Осциллограммы тока и напряжения дуги переменного тока где: u_c – напряжение сети, u_d – напряжение дуги, i_d – ток дуги.

Помимо сравнения осциллограмм, был проведен анализ полученных металлических частиц, который показал, что при проведении эксперимента на воздухе качество получаемых гранул гораздо ниже, нежели при получении в инертной среде. Так частицы, полученные в инертной среде, имеют чистоту в пределах 99% в иных же условиях в гранулах металла присутствуют включения кислорода и других элементов, что негативно сказывается на их качество и дальнейшее использование в 3D-печати.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время обучения в аспирантуре была подготовлена и написана кандидатская диссертация, которая включает в себя:

1. Выполнен анализ особенностей существующих методов производства металлических порошков и обоснована возможность применения метода воздушно-дугового распыления металла двухструйным плазмотроном для получения мелкодисперсных частиц.

2. Разработаны нестационарные мультифизические модели плазменной двухструйной установки в программе Comsol Multiphysics и MathCad. По результатам полученных моделей и свойств веществ был проведен анализ работоспособности и устойчивости данной технологии при расходах газа $G=0.3-0.5\text{г/с}$.

3. Было проведено сравнение плазменной технологии при разных рабочих частотах и выявлено, что при повышенной частоте рабочая

характеристика плазмотронов ПН-ПА1 является эффективней, чем при частоте $f=50$ Гц.

4. Произведен математический расчет, описывающий влияние плазменного потока на металлический стержень, включая скорость плавления и движения металла во время работы технологической установки.

5. Проведен анализ охлаждения титановых частиц в двух разных газовых средах: аргоновой и гелиевой. Сделан вывод по выбору лучшего технического газа как для поджигания плазменной дуги так и для заполнения технической камеры.

6. Разработана и прошла опытные испытания новая конструкция высокоскоростного плазмотрона ПН-ПА1 с укороченным дуговым каналом для распыления металлических изделий.

7. Получен стальной порошок с высокой сферичностью и фракционностью 30-100 мкм, который применим для использования в аддитивных технологиях.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Kadyrov A. The research of the properties of the plasma torch on alternating current, for the development of PREP technology / Kadyrov A., Frolov V., Yushin B. // November 2019. IOP Conference Series Materials Science and Engineering 643:012074 DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012074 (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
2. Murashov Iu. Development of the arc plasma torch operation mathematical model for spheroidization of fine-dispersed powders / Murashov Iu., Frolov V., Kadyrov A. // July 2018. Journal of Physics Conference Series. DOI: 10.1088/1742-6596/1058/1/012024 (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
3. Кадыров А. Численное моделирование дугового плазмотрона постоянного тока с учетом явлений неустойчивости плазменного потока / Кадыров А., Фролов В., Мурашов Ю. // Электричество, 2018, № 5, с. 52–56 DOI: 10.24160/0013-5380-2018-5-52-56 (рекомендовано ВАК)
4. Kadyrov A. Investigation of the Properties of a Two-Jet Arc Plasma Torch to Obtain a Metal Powder / Kadyrov A. Yushin B., Frolov V. // Conference: 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EConRus) DOI: 10.1109/ EConRus

9466.2020.9039081 (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)

5. Kadyrov A. Numerical Simulation of a Plasma Jet with Several Electrodes Used in the Technology of Creating Powders for 3d Printers / Kadyrov A., Frolov V., Yushin B. // Conference: 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) DOI:10.1109/EIConRus.2019.8657308 (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
6. Obraztsov N. A non-stationary model of the AC plasma torch / Kadyrov A., Surov A., Popov V., Subbotin D. // November 2019IOP Conference Series Materials Science and Engineering 643:012075 DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012075 (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)