

*На правах рукописи*

**АНАХОВ Сергей Вадимович**

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ПРИНЦИПОВ И МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ПЛАЗМОТРОНОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И  
БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена на кафедре «Технология сварочного производства» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
**Шалимов Михаил Петрович**

Официальные оппоненты: **Сараев Юрий Николаевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, главный научный сотрудник лаборатории композиционных материалов;

**Потехин Борис Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург, профессор кафедры «Технологии металлов» Института автомобильного транспорта и технологических систем;

**Дмитриев Андрей Николаевич**, доктор технических наук, ФГБУН Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии черных металлов

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Защита диссертации состоится 14 июня 2019 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=288666>

Автореферат разослан \_\_\_\_ . \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук

Раскатов Евгений Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В настоящее время существует целый ряд государственных промышленных приоритетов, в реализации которых плазменные технологии могут сыграть существенную роль. Как известно, первым и наиболее распространённым направлением использования плазмотронов является их применение в процессах разделки металла и металлолома. В настоящий момент существует большой выбор металлорежущих плазмотронов различного функционального назначения и конструктивного исполнения, как отечественных, так и зарубежных исполнителей. По некоторым позициям (скорости резки, себестоимости и безопасности) отечественные плазмотроны и вспомогательное оборудование имеют сопоставимые с зарубежными аналогами характеристики, но в большинстве случаев сравнительные параметры импортной продукции имеют лучшие показатели, чем российской (по материалу- и энергопотреблению, параметрам качества, степени автоматизации и даже дизайну устройств и установок). Среди разработок отечественного электроплазменного оборудования практически отсутствуют инструментальные плазмотроны для прецизионной резки (технология «сжатой» или «узкоструйной» плазмы), обеспечивающие повышенную точность и качество реза кромок, высокую материальную и энергетическую эффективность, а также безопасность процесса. По этой причине разработку энергоэффективных плазменных технологий с современными системами автоматического управления можно отнести к сфере задач направлений EnergyNet и TechNet Национальной Технологической Инициативы (НТИ) и Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

Одним из направлений исследований плазменных технологий является сфера их безопасного применения. Использование плазмотронов в большинстве случаев требует контроля и обеспечения безопасного уровня по шумоизлучению, загрязнению газовыми аэрозолями, тепловой, световой и электромагнитной нагрузке. Добиться этого можно несколькими путями: проектированием плазмотронов с пониженным уровнем негативного воздействия на рабочий персонал, использованием защитных средств и устройств, а также регламентацией режимов работы при повышенном уровне воздействия вредных факторов.

Отдельные разделы представленной работы выполнялись в соответствии с планами важнейших научно-исследовательских работ в сфере сварочных и родственных технологий, охраны труда и защиты окружающей среды. Ряд исследований осуществлялись при поддержке соответствующих грантов:

1. РФФИ № 11-08-11502-с «Электроплазменный шум: диагноз и рецепты лечения» 2011 г. (руководитель)
2. РФФИ № 11-08-01119-а «Теплофизические и газодинамические принципы профилирования газоздушных трактов малошумных плазмотронов» 2011 г. (руководитель)
3. АВЦП №2.1.2/6467 «Исследование факторов шумообразования в технологиях электроплазменного воздействия на материалы» 2009-2011 гг.
4. ФСРМПНТС (Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере – Фонд содействия инновациям) №07-5-НЗ.1-0071 «Разработка

плазменной технологии обезвреживания содосульфатных отходов глиноземных производств алюминиевых заводов» 2007 г.

5. Программа «Михаил Ломоносов» DAAD и МО РФ «Водород в высокочистом ниобии» Германский центр синхротронного излучения DESY (г. Гамбург) 2004 г.

6. НИР по государственному заданию Министерства образования и науки Российской Федерации на 2012-2013 гг. «Разработка принципов и методов проектирования электроплазменных технологий в целях решения задач техногенной и экологической безопасности»: №14-318-12 «Разработка принципов проектирования технологии узкоструйной плазменной резки металлов» - 2012 г., № 14-318-13 «Разработка методов проектирования узкоструйной плазменной технологии» - 2013 г. (руководитель).

7. ФСРМПНТС (Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере – Фонд содействия инновациям) №230ГС1/8758 «Разработка высокоточной технологии плазменной резки металлов» 2014-2016 гг. (руководитель).

8. НИР по государственному заданию Министерства образования и науки Российской Федерации по выполнению проектов для получения первичных научных результатов, обеспечивающих расширение участия подведомственных образовательных организаций в реализации Национальной технологической инициативы на 2018-2019 гг. «Исследование и разработка методов энергоэффективной прецизионной резки металлов по технологии узкоструйной плазмы» (руководитель).

9. РФФИ №19-08-00190 А «Разработка фундаментальных научных основ применения процессов плазменной инсинерации в технологиях рециклинга отходов» 2019-2021 гг. (руководитель).

### **Степень разработанности темы исследования**

В работе систематизированы методы, применяемые при проектировании плазмотронов. В отличие от тенденций 60-70-х годов XX века с преобладанием экспериментальных подходов в настоящее время большая роль стала отводиться формализованным машинным методам проектирования, ускорившим процесс анализа и оптимизации конструкторских решений. Недостатками таких методов являются невысокая степень универсальности, функциональная и параметрическая неполнота анализируемых моделей. В то же время большую долю в общем объеме проектных процедур занимают эвристические подходы, использующие итерационные, конструктивные и иерархические методы. Их успешное применение существенно зависит от полноты используемых информационно-справочных моделей, опирающихся на широкую базу накопленных к настоящему времени решений в сфере проектирования плазмотронов.

Эффективность проектирования должна оцениваться различными методами автоматизированного и экспериментального анализа. В первом случае применение полученных ранее критериально-параметрических соотношений для однотипных плазмотронов требует коррекции, учитывающей новые конструктивные решения. Необходимо также уточнение газодинамических параметров процесса, определяющих эффективность работы плазмотрона, в свою очередь, также зависящих от конструктивных особенностей плазмотрона и технологии его применения. Оценка эффективности проектирования по результатам экспериментальных исследований и испытаний в настоящее время может опираться на широкий круг методов, ряд из

которых, в первую очередь при анализе факторов безопасности, требует разработки специфичных для плазменных технологий методик измерения.

В работе проведён комплекс исследований, позволивших по результатам моделирования газодинамических и теплофизических процессов определить влияние конструкции газоздушного тракта (ГВТ) плазмотрона на течение плазмообразующего газа (ПОГ) и сформулировать основные принципы и методы конструирования ГВТ металлорежущих плазмотронов. Предложены критерии эффективности проектирования систем газовихревой стабилизации и методика проектирования по газодинамическим критериям, улучшающая показатели производительности, качества, надежности и безопасности работы плазмотронов. Оптимизация конструкций ГВТ плазмотрона по газодинамическим критериям позволила создать ряд модернизированных плазмотронов, сопоставимых и превосходящих по ряду технических характеристик зарубежные образцы.

В работе представлен комплекс параметров и метод квалиметрического анализа, определяющие эффективность проектирования по критериям функциональности, качества и безопасности. Показано, что одним из оптимальных решений повышения эффективности работы плазмотронов для резки является развитие внедряемой в настоящее время технологии «точной» («сжатой») плазмы, которая имеет улучшенные характеристики для большей части параметров, определяющих эффективность проектирования и работы плазморезательного оборудования.

**Цель работы.** Целью работы является развитие принципов и методов проектирования электродуговых плазмотронов, повышающих эффективность их применения в электроплазменных технологиях по показателям функциональности, качества и безопасности.

Объектами исследований являются физические процессы и конструкции инструментальных и нагревательных плазмотронов, применяемых в технологиях плазменной резки, сварки, обработки металлов, а также параметры, режимы и условия эксплуатации плазменного оборудования.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

1. Систематизация принципов и методов, применяемых при проектировании плазмотронов.

2. Определение комплекса параметров, определяющих эффективность проектирования по показателям функциональности, качества и безопасности. Развитие на их основе системных принципов проектирования плазмотронов.

3. Развитие на основе газодинамического анализа плазмотронов для резки металлов принципов и методов проектирования с целью повышения эффективности их работы.

4. Разработка на основе экспериментальных исследований и анализа механизмов генерации акустического и оптического излучения в электроплазменных технологиях принципов и методов проектирования плазменного оборудования по критериям производственной безопасности.

5. Конструирование на основе разработанных принципов и методов проектирования одно- и двухпоточных плазмотронов для прецизионной резки металлов.

6. Проведение диагностики предложенных решений в области проектирования электроплазменных технологий и процессов по критериям эффективности, качества и безопасности.

7. Анализ возможности применения разработанного плазморезательного оборудования для резки низколегированных сталей в технологиях производства сварных конструкций без дополнительной механической обработки кромки реза.

#### **Научная новизна работы:**

1. Обоснована необходимость при проектировании плазменного оборудования обратить особое внимание на принцип безопасности, как правило, не принимаемый в расчет при конструировании плазмотронов и требующий выполнения оптимизационных процедур при соблюдении системного подхода в проектировании.

2. Определено, что газодинамические особенности течения плазмообразующего газа (ПОГ) определяют эффективность, качество и безопасность работы плазмотрона. Показано, что теоретические расчеты газодинамических, электрических и теплофизических параметров плазмотронов следует проводить, учитывая потери давления в газовоздушном тракте (ГВТ) плазмотронов с различными схемами газового распределения. Такой же учет требуется при определении частотных и энергетических характеристик шумоизлучения плазмотронов. Отмечено, что снижение потерь давления по ГВТ способствует повышению кинетических и энергетических параметров плазменной струи, снижению тепловых потерь в сопловом узле плазмотрона.

3. По результатам анализа газодинамических особенностей протекания ПОГ по ГВТ плазмотронов разработана методика оценки эффективности систем газовихревой стабилизации плазменной дуги, опирающаяся на определение критерия равномерности распределения потока ПОГ по сечению каналов ГВТ. На её основе выявлены недостатки конструкции ГВТ, влияющие на неравномерность распределения скоростей ПОГ по сечению ГВТ, предложены принципы и методика автоматизированного проектирования ГВТ плазмотронов по газодинамическим критериям, найдены эффективные конструктивные решения для новых газовихревых систем с комплексом газодинамических фильтров (ГДФ), повышающие производительность, качество и безопасность процесса резки металлов. Выявлено влияние температуры плазменной дуги на равномерность распределения потока ПОГ, приводящее к незначительному (в пределах 10 %) снижению эффективности газовихревой стабилизации дуги.

4. Доказано, что процессы акустической генерации существенным образом зависят от конструктивных и технологических параметров плазмотронов и электроплазменных технологий. Появление дискретных тонов в спектре шума можно объяснить с помощью теоретических моделей, связанных с механизмом резонансного самовозбуждения турбулентных пульсаций потока ПОГ на собственных частотах газовоздушного тракта плазмотрона с последующей передачей энергии звуковых колебаний и их излучением из сопла плазмотрона. По результатам проведённого анализа моделей генерации шумоизлучения в звуковой и ультразвуковой части спектра выявлены элементы ГВТ плазмотронов – сопловой узел и завихритель, геометрия которых определяет появление одного или двух резонансных пиков в спектре излучения или их отсутствие и размер акустического ядра плазменной струи (дуги). Предложена модель генерации шума двухструйными плазмотронами.

5. В развитие методики проектирования по газодинамическим критериям предложен метод проектирования сопловых узлов плазмотронов, позволяющий избежать резких перепадов площади проходного сечения ГВТ, и, следовательно, снизить вероятность появления тональных шумов в акустическом спектре плазмотрона. Показано, что спроектированные в целях повышения акустической безопасности идеализированные (плавные) профили сопловых узлов требуют коррекции по теплофизическим, материаловедческим и технологическим критериям, определяющим эффективность и надежность работы плазмотрона.

6. Показано, что эффективным проектным решением в технологиях резки металлов малых и средних толщин является применение способа газовихревой стабилизации и экранирования плазменной дуги за счет вторичного газового потока, применяемого в плазмотронах, работающих по технологии узкоструйной плазмы. Применение данного способа позволяет достичь максимальных показателей эффективности и безопасности процесса, а также качества, эквивалентного уровню, достигаемому при лазерной резке.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Установлен комплекс параметров, определяющих эффективность проектирования по критериям функциональности, качества и безопасности. Предложен метод квалиметрического анализа для оценки эффективности проектирования.

2. Сформулированы методы и принципы газодинамического проектирования плазмотронов, включающие в себя: создание системы газодинамических фильтров в целях выравнивания потока ПОГ по всему ГВТ; разработку схем подачи ПОГ; профилирование ГВТ, формы катодного и соплового узла, выбор оптимальных значений входного и выходного отверстий участков ГВТ, оптимизацию распределения газового потока по тракту плазмотрона.

3. Разработаны методики оценки газодинамических параметров, которые позволяют выявить конструктивные недостатки в ГВТ плазмотронов и повысить эффективность течения ПОГ при их проектировании. Предложены упрощенные аппроксимирующие зависимости, позволяющие проводить оценку газодинамических параметров, избегая сложного многофакторного анализа, учитывающего все нюансы конструкций ГВТ и режимов работы для однотипных исследуемым плазмотронов. На основе газодинамических принципов сформулированы принципы проектирования и для отдельных участков ГВТ плазмотронов для резки.

4. Сконструированы системы охлаждения плазмотронов для резки, позволяющие осуществлять свободную прокачку теплоносителя в заявленных технологических режимах.

5. Разработаны, изготовлены и испытаны конструкции одно- и двухпоточных плазмотронов, обеспечивающих соответствие требованиям российских и европейских стандартов по показателям качества реза в сочетании с высокой производительностью процесса резки, его экономичностью и безопасностью. В ряду этих конструкций – не имеющая отечественных аналогов модель плазмотрона для прецизионной («точной») плазменной резки металлов малых и средних толщин, работающая по технологии узкоструйной плазмы. Новизна конструкций плазмотронов защищена авторскими свидетельствами и патентами, практическая значимость подтверждена актами внедрения.

6. Методом кваліметричного аналізу показано перевагу розроблених в рамках даної роботи плазматронів ПМВР-2М (однопоточного) і ПРВР-5.2 (двухпоточного узкоструйного) по більшості критеріїв ефективності, якості та безпеки по порівнянню з базовими вітчизняними та деякими зарубіжними плазматронами.

7. Предложено комплекс методов экспериментальных исследований в производственных и лабораторных условиях для определения параметров акустического излучения плазматронов – спектральных, энергетических и пространственных характеристик для различных плазменных технологических процессов.

8. Предложены методы профилирования соплового узла плазматрона в его прикатодной области и цилиндрическом сопловом канале для устранения причин, влияющих на появление дискретных составляющих акустического спектра, с последующим снижением общего уровня шума

9. Показано, что интенсивность акустического и оптического излучений плазматронов зависит от геометрии плазменной дуги (струи) и может быть снижена за счет её обжатия и стабилизации. Внедрение плазматронов с двухпоточным способом подачи газа (формирующим и стабилизирующим плазменную струю ГВТ) способно снизить уровень оптического и акустического излучений.

10. Разработаны конкретные конфигурации сопловых узлов: с экспоненциальным, катеноидальным и эквидистантным профилями, а также с соплом Витошинского. Показаны их преимущества и недостатки с акустической и технологической точек зрения.

11. Выявлен существенный экономический эффект, достигаемый при внедрении узкоструйной плазменной технологии по сравнению с другими видами (механической, газовой и т.д.) резки. Снижение энергозатрат и материальных потерь при этом достигается, в основном, за счет уменьшения требуемой, как правило, дальнейшего механического удаления, зоны термического влияния разрезаемого металла. Помимо этого следует учесть пониженное энергопотребление и повышенную надежность плазматрона, улучшенные показатели качества и безопасности его работы.

12. Показана возможность подготовки заготовок под сварку без предварительного механического удаления слоя металла кромки реза за счет применения ряда модернизированных вітчизняних плазматронів (включая созданные в рамках данной работы).

Перспектива развития полученных в работе результатов заключается в совершенствовании технологии узкоструйной плазмы, использующей двухпоточный метод газовихревой стабилизации и экранирования плазменной дуги, а также в полноценном обосновании и регламентировании применимости чистой резки металлов под сварку современными вітчизняними та імпорними плазматронами (включая созданные в рамках данной работы).

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

Для достижения поставленных целей было использовано сочетание теоретических, экспериментальных и вычислительных методов исследований. Методологической основой работы являются современные исследования и классические труды вітчизняних та зарубіжних учених в области теории и

практики конструирования плазмотронов и их применения в электроплазменных технологиях, безопасности производственных процессов, общей акустике, аэродинамике, теории колебаний, сварочной технологии, инженерной экологии, рекламные и патентные материалы в сфере использования плазмотронов в различных отраслях промышленности. Экспериментальные исследования выполнены в производственных (натурных) и лабораторных условиях, проверка эффективности проектирования проведена различными методами контроля по критериям качества и безопасности с применением современных средств измерения и контроля.

Для проведения экспериментов была создана установка плазменной резки, состоящая из водяного стола для раскроя металла с токоподводом, механизма перемещения плазмотрона «Микрон», источника питания Кельберг РВ S-45W, системы подготовки сжатого воздуха и плазмотронов различных модификаций. Параметры режима резки фиксировали с помощью электро- и газоизмерительных приборов. Акустические параметры контролировались шумомером, оптические - люксметром. Исследования параметров эффективности и качества реза и сварных соединений производились по стандартизованным методикам в лаборатории MPL-Gruppe Германского центра синхротронного излучения (DESY), в ЦЗЛ ПАО «Уралмашзавод», лабораториях микромеханики материалов и объемного и поверхностного деформирования Института Машиноведения УрО РАН. Теоретический расчет течения потока ПОГ по каналам ГВТ плазмотрона выполнялся в программных средах MathCAD и SolidWorks с использованием приложения Flow Simulation. Обработка и анализ экспериментальных данных проводились с помощью методов математической статистики.

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

1. Принципы и методика автоматизированного проектирования ГВТ плазмотронов, основанная на определении потерь давления и критерия равномерности распределения потока ПОГ по сечению каналов ГВТ и позволяющая найти конструктивные решения для новых газовихревых систем, повышающие производительность, качество и безопасность процесса резки металлов.

2. Модели генерации шума одно- и двухпоточными плазмотронами, основанные на механизмах струйного акустического излучения и резонансного самовозбуждения турбулентных пульсаций потока ПОГ на собственных частотах ГВТ плазмотрона и позволяющие выявить элементы ГВТ, ответственные за повышенный уровень шумоизлучения, и предложить методику проектирования (профилирования) завихрителя и сопловых узлов в целях повышения акустической безопасности плазмотрона.

3. Экспериментальное обоснование возможности подготовки заготовок под сварку без предварительного механического удаления слоя металла кромки реза за счет применения ряда модернизированных отечественных плазмотронов (включая созданные в рамках данной работы).

4. Метод квалиметрического анализа металлорежущих плазмотронов, позволяющий дать интегральную оценку результатов проектной работы и применения плазменных технологий по критериям эффективности, качества и безопасности.

**Степень достоверности полученных результатов** подтверждается применением современных методов исследований и большим объемом

экспериментального материала, обработанного с использованием методов математической статистики. Положения и выводы по работе не противоречат известным научным представлениям и результатам.

#### **Степень достоверности и апробация работы.**

Основные результаты работы доложены и обсуждены на расширенных научных семинарах кафедр «Технология сварочного производства» УрФУ (6 июня и 3 декабря 2018 г.), «Сварочное производство, метрология и технология материалов» ПНИПУ (24 апреля 2018 г.), сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э. Баумана (31 октября 2013 г.), «Сварка и мониторинг нефтегазовых сооружений» РГГУ им. Губкина (22 декабря 2011 г.), заседании научно-методического Совета Российского научно-исследовательского института трубной промышленности (26 октября 2012 г.), научно-технических конференциях «Сварка и диагностика» в рамках IX, X, XI, XIII, XIV, XV, XVI Международной специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика» (2009, 2010, 2011, 2013, 2014, 2015, 2016 гг., Екатеринбург), XVII региональной научно-технической конференции «Сварка и родственные технологии» (2017 г., Екатеринбург), VII и VIII Уральской научно-практической конференции «СВАРКА. РЕНОВАЦИЯ. ТРИБОТЕХНИКА» (2015, 2017 и 2019 гг., Н. Тагил), XXV и XXVI научно-технической конференции сварщиков Урала и Сибири «Современные проблемы сварочного производства» (2015 и 2016 гг., ЮУрГУ, Челябинск), VII Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении» (2016 г., Томск), VIII, IX и X международной научно-практической конференции «Новые информационные технологии в образовании» (2015-2017 гг., Екатеринбург, Магнитогорск), международной конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии» (2015 и 2017 гг., МЭИ, Москва), Международных научно-технических конференциях, посвященных 125- и 130-летию изобретения Н.Г. Славяновым электродуговой сварки плавящимся электродом (2013 и 2018 гг., Пермь); в рамках международной конференции «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее» (2013 г., Киев: Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины). Разработки в сфере безопасности плазменных технологий были представлены на сессии Научного Совета РАН по акустике и XXIV сессия Российского акустического общества (2011 г., Саратов), III, IV и VI Международном экологическом конгрессе ELPIT (2011, 2013, 2017 гг., Тольятти, ТПУ), III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита населения от повышенного шумового воздействия», (2011 г., С.-Петербург), Международной научно-практической конференции «Техносферная безопасность, надежность, качество, энергосбережение» (2011 г., Ростов-на-Дону), II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Проблемы безопасности и защиты населения и территории от чрезвычайных ситуаций» (2011-2013 гг., Уфа, УГАТУ).

Степень достоверности подтверждается внедрением разработанной методики проектирования плазмотронов в ООО НПО «Полигон» для модернизации однопоточных плазмотронов серии ПМВР-М и производства двухпоточных плазмотронов серии ПМВР-5, а также внедрением плазмотронов ПМВР-2М в технологии производства трубного проката на Волжском заводе металлоконструкций и Синарском трубном заводе (г. Полевской).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 44 работы, в том числе 3 монографии, 35 статей в журналах списка ВАК, включая 15 статей в журналах списка Scopus, получено 2 патента, 1 свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, приложений А и Б. Работа изложена на 291 странице, содержит 156 рисунков, 52 таблицы. Библиографический список содержит 167 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано краткое обоснование актуальности темы диссертации, определена его цель и задачи, сформулированы положения, определяющие научную новизну и практическую ценность диссертационной работы.

В **первой главе** проведен анализ современных принципов и методов проектирования и использования плазмотронов. Отмечено, что среди всего комплекса плазменных технологий особого внимания заслуживает разделительная резка металлов. Как правило, в данной технологии используются так называемые «плавильные» плазмотроны, в которых полезная теплота выделяется на одном из опорных пятен дуги, вынесенном на нагреваемое и включенное в электрическую цепь изделие. Помимо тепловыделения в этом случае полезной оказывается и высокая кинетическая энергия плазменной дуги (струи), обжатой потоком воздуха или какого-либо другого газа, проходящего на высокой скорости через сопло плазмотрона. Электрическая дуга и ионизированный газ способны за счет высокой температуры и кинетической энергии разрезать любой электропроводный материал быстро и точно, не нагревая его обширные участки. В отдельных случаях (при разделке неэлектропроводных материалов) применяются «струйные» плазмотроны, в которых дуга горит внутри плазмотрона.

Известно, что первые отечественные комплектные установки для воздушно-плазменной резки (ВПР) металлов были созданы в конце 60-х - начале 70-х годов и результате к концу XX века в России сформировалось мощное направление теоретических исследований и было выпущено и внедрено большое количество электроплазменных установок по практически всему спектру упомянутых выше технологий. Однако, анализ современного рынка электроплазменных установок и плазмотронов свидетельствует, что по некоторым позициям (скорости, себестоимости и безопасности) отечественные плазмотроны и вспомогательное оборудование имеют сопоставимые с зарубежными аналогами характеристики, но в большинстве случаев сравнительные параметры импортной продукции имеют лучшие показатели, чем российской (по материалу- и энергопотреблению, параметрам качества, степени автоматизации и простоте управления и даже дизайну установок). Причем, по некоторым показателям эти параметры отличаются в худшую для российских плазмотронов сторону на 20-30%. Отдельно следует отметить технологию «точной» или «сжатой» плазмы, представленной в серии аппаратов плазменной резки HiFocus (Kjellberg) и EASYTHERM (Messer Greisheim) – Германия, а также HyPerformance (Hypertherm) – США. Данная технология в настоящий момент фактически закрывает значительный с технологической и экономической точки зрения пробел между двумя известными методами разделки тонколистового металла – лазерной и воздушно-

плазменной. Отечественных аналогов подобных технологий практически нет, а проводимые по ней исследования опираются, как правило, на продукцию упомянутых выше производителей.

К настоящему времени разработано большое количество плазмотронов, классифицировать которые можно по целому ряду признаков, среди которых помимо функциональных, можно выделить также их конструктивные и параметрические особенности. В работе представлена классификация плазмотронов, обобщающая многочисленный материал (Быховского Д.Г., Жукова М.Ф., Васильева К.В., Донского А.В., Аньшакова А.С., В.С. Чередниченко, Дресвина С.В. и др.), в котором обобщены различные способы структурирования их модификаций и технологического применения. Согласно данной классификации большинство применяемых в настоящее время плазмотронов (для сварки, резки, напыления и т.д.) следует отнести к категории плазменного инструмента. Широта номенклатуры выпускаемых плазмогенераторов и технологий их применения заставляет искать общие принципы, лежащие в основе их функционального применения, и обуславливающие особенности их классификации по конструктивным и параметрическим аспектам. На основе структурно-функционального метода изучения технических объектов и исследований рассмотрены процессы, обеспечивающие стабильное выполнение плазменной технологической процедуры. Разделение материи на объекты воздействия (массу, энергию и информацию) и средства воздействия – материально-энергетические комплексы – позволяет выделить процессы, обеспечивающие движение материи между средствами воздействия.

В связи с обозначенными проблемами на современном рынке плазмотронной техники, перед отечественными разработчиками плазменной техники встают вопросы, связанные с четкой формулировкой критериев, на которые они должны ориентироваться в процессе проектирования оборудования, а перед потребителями – проблема поиска методик, позволяющих им сделать оптимальный, в соответствии с их потребностями и возможностями, выбор. Всё это создаёт необходимость уделить отдельное внимание формулировке общих подходов, лежащих в основе проектирования плазменного оборудования.

Задача проектирования плазмотронов должна решаться с учетом целого ряда принципов (рис.1), которые можно классифицировать по 3-м основным группам. В первую очередь, это принцип функциональности, подразумевающий достижения в результате проектирования определённых показателей назначения объекта. Применительно к электроплазменным технологиям это означает ориентацию на характерные для большинства промышленных устройств показатели производительности, надежности и качества. В качестве интегральных показателей производительности для плазменной разделительной резки можно взять удельную производительность (тн/чел·мес), удельные энергозатраты (руб. (кВА)/тн), а также скорость резки металла при заданной толщине. Критерии надежности для плазмотрона должны, очевидно, подразумевать длительность безотказной работы его основных систем, из которых наименее стойким является сопловой узел, имеющий ограниченный ресурс работы. Качество обработки при электроплазменном воздействии на материал, как правило, имеет широкую номенклатуру показателей, специфичных для конкретной технологии, и в большинстве случаев регламентируется соответствующими стандартами. В связи с тем, что применение

плазменных технологий характеризуется целым набором опасных и вредных факторов, при разработке такого оборудования необходимо закладывать регламентируемые ГОСТами и СНиПами параметры безопасного функционирования (нормы по акустическому, тепловому и электромагнитному излучению, выделению аэрозолей) и методы защиты от электрических, газовых, механических и других видов опасных воздействий.

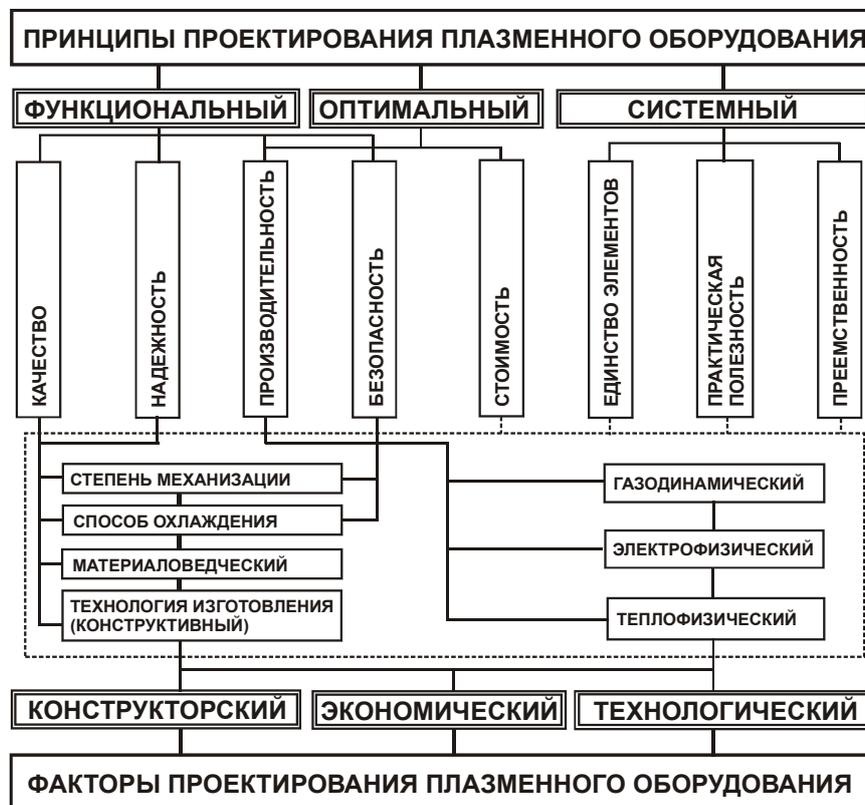


Рисунок 1 – Принципы и факторы проектирования в электроплазменных технологиях

Поскольку плазматрон по своему конструктивному и технологическому исполнению является сложным многокомпонентным устройством, процесс его проектирования должен, очевидно, опираться на системный принцип, подразумевающий разработку не отдельных узлов плазмотрона, а всей его конструкции, функционирующей в единстве её отдельных элементов, и учитывающие накопленный к данному моменту исторический опыт проектирования.

Ввиду того, что применение в процессе проектирования принципов функциональности и системности означает одновременный учет большого числа иногда взаимно противоречивых (конфликтных) критериев, важным принципом становится оптимизация параметров объекта проектирования. Применительно к электроплазменным технологиям речь должна, очевидно, идти об оптимизации по критериям эффективности, стоимости и безопасности. Эффективность подразумевает достижение максимальных показателей производительности процесса с наименьшими материальными и социально-экономическими затратами.

Среди факторов, которые необходимо учитывать при проектировании плазменного оборудования, отдельного внимания заслуживает газодинамический фактор. Анализ газодинамических процессов в ГВТ плазмотрона должен лежать в

основе понимания конструкторских задач, направленных на повышение функциональных параметров и безопасности работы плазменных технологий.

С учетом того, что фактический материал, касающийся конструктивных и технологических особенностей плазменного оборудования, как правило, представляет разработки в виде готового к применению испытанного образца без описаний процедур и методов самого проектирования, в работе систематизирована и представлена классификация методов проектирования электроплазменного оборудования (рис.2). Отмечена тенденция возрастания роли формализованных процедур в современных методах, обращено внимание на методы, применение которых имеет особую специфику при проектировании плазменного оборудования (представлены конкретные примеры применения отдельных методов).



Рисунок 2 – Методы проектирования электроплазменных технологий и оборудования

Примером, иллюстрирующим результат проектирования на уровне отдельного элемента плазмотрона, являются конструкции его соплового (электродного) узла. Основные эксплуатационные характеристики плазмотрона определяются конструкцией и материалом трёх основных элементов: электрода (при прямой полярности – катода), сопла и изолятора. При этом максимальная эффективность и качество достигаются лишь в том случае, когда конструктивные и технологические параметры перечисленных элементов, специфичные для каждой конструкции плазмотрона, взаимосвязаны, образуя систему, называемую дуговой камерой. Технологические и конструктивные параметры находятся в определённой взаимосвязи. Детальное рассмотрение взаимосвязи конструктивных и технологических параметров, требует учета газодинамических параметров потока ПОГ в сопловом узле (массового расхода  $G$  и давления  $P$ ). Так, значение критического

тока (выше которого начинается интенсивное разрушение катода)  $I_{кр} = f(G, P, d)$ , а в качестве условий длительного ресурса работы катода в воздушной среде:

$$G/Pd \geq 2 \cdot 10^{-6}; I < I_{кр} = 1,6 \cdot 10^6 \sqrt{G/P}. \quad (1)$$

Отдельное внимание обращено на применение формализованных методов проектирования. Представлены варианты алгоритмизации процедуры проектирования на основе схем, функциональных и параметрических зависимостей, формально-логических отношений и т.д. для их последующего использования в человеко-машинной системе, включая известные примеры информационно-справочных моделей (классификации плазмотронов и их элементов) К.В. Васильева (1974-й год), В.А. Малаховского (1988-й год) и А.А. Кайдалова (2007-й год). В качестве иллюстрации применимости таких методов к проектированию электроплазменных технологий упомянута процедура определения критериальных параметрических соотношений, разработанная в 70-е и 80-е годы в СО АН СССР. Отмечено ограниченное её применение, обусловленное как расширением номенклатуры современных конструкций плазмотронов, так и неопределенностью ряда конструктивно зависимых газодинамических критериев (например, давления в сопловом узле), а также малая эффективность её применения для оценки результатов, достигнутых в ходе применения конструктивных методов проектирования из-за существенной методической погрешности.

Эффективность проектирования должна оцениваться различными методами автоматизированного и экспериментального анализа. Для сравнения различных конструкций плазмотронов нужна универсальная методика определения особенностей течения ПОГ по каналам плазмотрона с целью определения наилучших и нахождения новых проектных решений на каждом участке ГВТ. Ряд экспериментальных методов, особенно, при анализе факторов безопасности, требует разработки специфичных для плазменных технологий методик измерения. Применительно к технологии плазменной резки определены и детализированы параметры функциональности, качества и безопасности.

В работе систематизированы параметры, определяющие качество и эффективность плазменного процесса, большая часть которых регламентируется стандартами. Например, качество реза регламентируется сочетанием 3-х показателей: отклонением поверхности реза от перпендикулярности, шероховатостью поверхности реза и величиной зоны термического влияния. Очевидно, что ряд заявленных критериев (энергопотребление или вольтамперные характеристики (ВАХ), к.п.д.; параметры плазменной струи, определяющие скорость, толщину и ширину реза) могут быть оценены в процессе проектирования плазменного оборудования. В работе представлены многочисленные примеры, характеризующие параметры функциональности и качества, достигнутые на современном этапе проектирования отечественными и зарубежными производителями. Отмечено, что одним из универсальных решений проблем эффективности, качества и безопасности является применение технологии «сжатой» или «узкоструйной» плазмы, использующей двухконтурный принцип формирования плазменной струи с её стабилизацией потоком дополнительно закрученного газа, поступающего из второго контура.

Процесс проектирования электроплазменного оборудования должен включать в себя важную задачу учета фактора безопасного его применения. Исходя из объективных показателей, обслуживающий персонал работает в экстремальных

условиях, а профессию оператора (плазморезчика) можно отнести к особо опасной. С точки зрения проблемы обеспечения безопасности в рабочей зоне плазменного воздействия соответствующая технология и, в первую очередь, сам плазмотрон, рассматриваются как объекты регулирования по критериям производственной безопасности. Большое количество вредных и опасных производственных факторов данной технологии были выявлены в 70-80-х годах XX века (ВНИИ охраны груди ВЦСПС (г. Ленинград) и НИИ охраны труда (г. Свердловск), Московский НИГИ им. Ф. Ф. Эрисмана). В те же годы были разработаны и нормативные акты, регламентирующие требования по безопасности таких процессов. В работе рассмотрены нормы и степень влияния большинства вредных и опасных факторов технологии плазменной резки, включая и результаты проведённых ранее исследований автором и Ю.А. Пыкиным. По результатам этих исследований была получена подробная информация о характерных для электроплазменных технологий акустических полях, обращено внимание на ультразвуковое воздействие, на наличие тональных составляющих в звуковой части спектра, пространственную направленность излучения, предложены способы по снижению шума.

На основании сделанных в главе 1 выводов сформулированы задачи дальнейшего исследования.

- Разработка на основе исследования конструктивных особенностей плазмотронов для резки металлов газодинамических и теплофизических принципов и методов проектирования с целью повышения эффективности их работы.

- Разработка на основе экспериментальных исследований и анализа механизмов генерации акустического и электромагнитного излучения в электроплазменных технологиях принципов и методов проектирования плазменного оборудования по критериям производственной безопасности.

- Проведение диагностики предложенных решений в области проектирования электроплазменных технологий и процессов по критериям эффективности, качества и безопасности.

**Вторая глава** посвящена разработке принципов и методов проектирования металлорежущих плазмотронов по газодинамическим и теплофизическим критериям.

Как было отмечено в главе 1, газодинамические особенности течения ПОГ определяют не только эффективность и качество, но и безопасность работы плазмотрона. В этой связи была поставлена задача газодинамического анализа влияния конструктивных особенностей газоздушного тракта плазмотрона на эффективность и безопасность его работы. Данные исследования проводились путем газодинамического анализа базовых конструкций ГВТ известных плазмотронов для резки ПМВР-М, ВПР-410, ПЗ-400ВА. Целью данного анализа была формулировка газодинамических принципов проектирования плазмотронов подобного типа и предложение ряда перспективных конструкций плазмотронов для резки, спроектированных с учетом данных принципов. Спроектированные конструкции, в свою очередь, должны быть подвергнуты сравнительному газодинамическому анализу, позволяющему выявить особенности и сформулировать общие принципы их проектирования.

В ходе анализа исследовалось изменение газодинамических параметров ПОГ (потери динамического напора, средние по сечению осевые скорости газа и характер течения) при его прохождении по ГВТ плазмотрона. Вычисления производились в

программной среде MathCAD с учетом закономерностей газовой динамики. Для ряда конструкций плазмотронов было произведено моделирование параметров движения и теплообмена текучей среды с помощью уравнений Навье-Стокса в программной среде SolidWorks с приложениями Flow Simulation и EFD.lab. Погрешность теоретической оценки газодинамических параметров составила 5-10 %.

При расчетах параметров движения в программной среде SolidWorks использовалась расчетная система уравнений сохранения массы, импульса и энергии нестационарного пространственного течения в рамках подхода Эйлера в декартовой системе координат:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d(\rho u_k)}{dx_k} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{d(\rho u_i)}{dt} + \frac{d(\rho u_i u_k - \tau_{ik})}{dx_k} + \frac{dP}{dx_i} = S_i, \quad (3)$$

$$\frac{d(\rho E)}{dt} + \frac{d((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i)}{dx_k} = S_k u_k + Q_H, \quad (4)$$

где  $t$  - время, с;  $u$  - скорость текучей среды, м/с;  $\rho$  - плотность текучей среды, кг/м<sup>3</sup>;  $P$  - давление текучей среды, Па;  $S_i$  - внешние массовые силы, действующие на единичную массу текучей среды, Н/м<sup>3</sup>;  $E$  - полная энергия единичной массы текучей среды, Дж/кг;  $Q$  - мощность тепловыделения теплового источника в единичном объеме текучей среды, Вт/м<sup>3</sup>;  $\tau_{ik}$  - тензор вязких сдвиговых напряжений, Н/м<sup>2</sup>;  $q_i$  - диффузионный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>, нижние индексы означают суммирование по трем координатным направлениям.

При определении параметров ПОГ использовалось уравнение состояния вида:

$$\rho = \rho(P, T, y), \quad (5)$$

где  $y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$  - вектор концентраций компонентов текучей среды.

Следует обратить внимание на то, что ГВТ плазмотронов для резки с газовихревой стабилизацией дуги характеризуется наличием участков резкого изменения профиля проходных сечений (ПС), что обусловлено как конструктивными, так и технологическими моментами. При этом весь ГВТ разбивается на несколько частей: (1) - входную, (2) - расширитель (зону выравнивания потока газа), (3) - завихритель и (4) - сопловой узел (область формирования плазменной струи), из которых наибольшее влияние на эффективность и безопасность работы оказывают конструктивные особенности 2-х последних (рис.3). Характерное распределение площадей проходных сечений по ГВТ плазмотронов ПМВР-М и ВПР-410, а также расчетные значения чисел  $Re$ , скоростей и давлений – на рис.4.

Анализ особенностей газодинамического течения различных конструкций плазмотронов показал, что теоретические расчеты газодинамических, электрических и теплофизических параметров плазмотронов следует проводить, учитывая потери давления в ГВТ плазмотронов с однопоточной схемой газового распределения. Такой же учет требуется при определении частотных и энергетических характеристик шумоизлучения плазмотронов. При расчете потерь динамического напора в таких плазмотронах можно пренебречь вязкими потерями на участках с соотношением  $L/D_g < 10$  ( $L$  – длина,  $D_g$  – гидравлический диаметр участка), с площадью поперечного сечения  $F > 20$  мм<sup>2</sup> при расходах ПОГ менее 6 м<sup>3</sup>/час. В общей доле потерь доля потерь

на трение составляет ~25%. Инерционные потери давления в плазматронах с вихревой стабилизацией составляют ~75% от общего количества потерь напора. Основной вклад в таких схемах дает завихритель (~55% инерционных потерь). Общее количество потерь растет с увеличением расхода ПОГ, что накладывает ограничения на предельные значения расходов при заданном давлении газа (мощность нагнетания ПОГ).

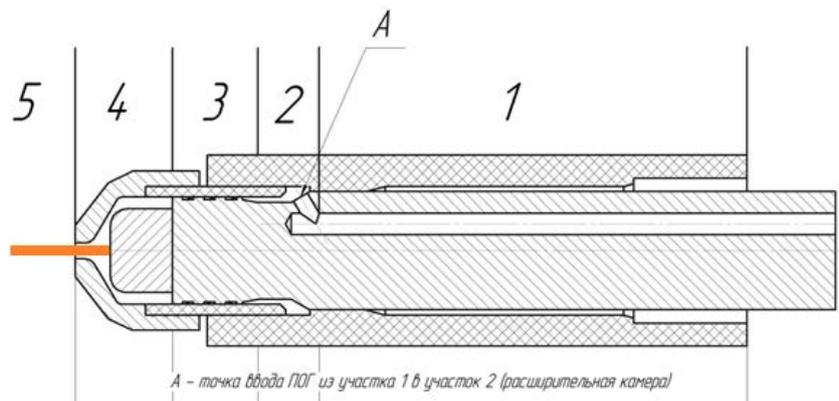


Рисунок 3 – Газовоздушный тракт (ГВТ) плазматрона для резки: 1 – вход; 2 – расширительная камера; 3 – завихритель; 4 – сопловой узел; 5-выход плазмы

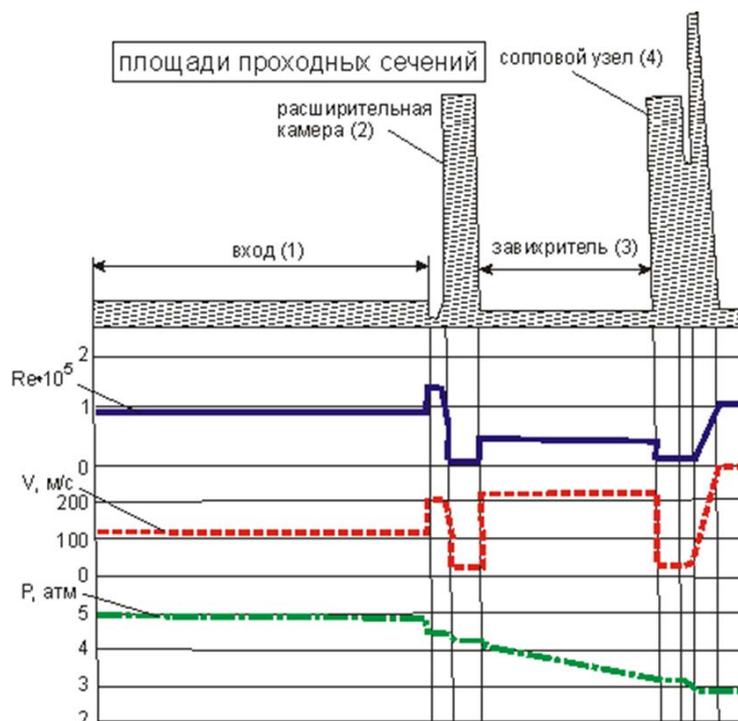


Рисунок 4 – Диаграмма площадей проходных сечений, чисел Re, скоростей V, давления (P) ПОГ по ГВТ плазматронов ПМВР-М и ВПР-410 ( $P_{вх}=5 \text{ атм}$ ,  $G=9 \text{ г/с}$ ), 1-10 – номера участков ГВТ различной площади сечения

Оценку газодинамических параметров можно вести по упрощенным аппроксимирующим зависимостям, избегая сложного многофакторного анализа, учитывающего все нюансы конструкций ГВТ и режимов работы для однотипных исследуемых плазматронов. При конструировании ГВТ плазматрона, следует учитывать, что снижение потерь давления по ГВТ способствует повышению кинетических и энергетических параметров плазменной струи, снижению тепловых потерь в сопловом узле плазматрона.

Наличие одной расширительной камеры в однотипных для металлорежущих плазмотронов схемах подачи ПОГ в нее из входной части может оказаться недостаточным для равномерного распределения потока на последующих частях ГВТ плазмотрона. Следует учесть, что равномерность распределения скорости потока ПОГ по сечению каналов плазмотрона – важный параметр, определяющий эффективность стабилизации и экранирования плазменной дуги, и влияющий в конечном деле на производительность и качество резки, а также надежность работы плазмотрона. С учетом этого фактора была разработана методика оценки равномерности распределения скорости потока ПОГ по каналам ГВТ плазмотрона. Расчетная модель скоростей ПОГ в плазмотроне представлена на рис.5.

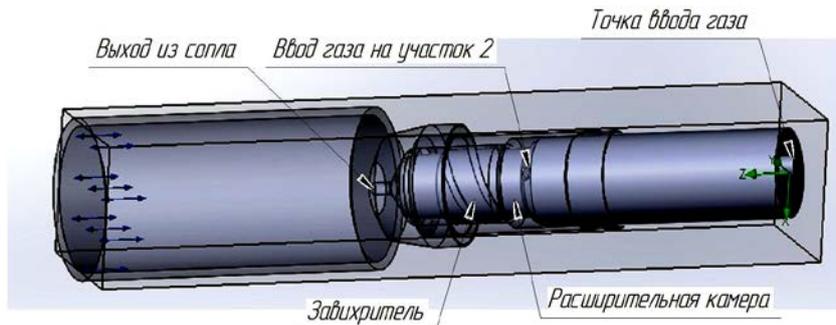


Рисунок 5 – Расчетная модель плазмотрона в EFD.lab

В качестве основного критерия оценки равномерности распределения скорости потока ПОГ по сечению ГВТ плазмотрона была взята величина  $K_i$ , определяемая отношением значений скоростей в рассматриваемых точках сечения (рис.6):  $K_1=V_1/V_4$ ,  $K_2=V_1/V_2$ ,  $K_3=V_1/V_3$ , ( $K_i=1$  при абсолютно равномерном распределении). Контрольное сечение для расчета равномерности распределения скорости было выбрано в плоскости, находящейся на входе в цилиндрическую часть сопла, так как взаимодействие плазменной струи и сопла плазмотрона, начинается именно в этой плоскости. Скорости потока ПОГ рассчитывались по двум контрольным линиям Г (между точками V1 и V4) и Д (между точками V2 и V3), равным по длине диаметру сечения канала ГВТ в контрольной плоскости.



Рисунок 6 – Схема определения равномерности распределения скорости потока ПОГ: а) в расширительной камере, б) в сопловом узле плазмотрона

Представленные на рис. 7 результаты расчета скоростей V1-V4 показывают, что полноценного выравнивания потока по сечению ГВТ на участке 2 не происходит. Аналогичные выводы можно сделать и относительно плазмотрона ВПР-410, имеющего сходную с ПРВР-М конструкцию ГВТ, что свидетельствует о недостатках

конструкции системы газодинамической стабилизации электродуговых плазмотронов рассматриваемого типа.

В результате газодинамического анализа базовых конструкций были сформулированы основные методы и принципы газодинамического проектирования плазмотронов:

- 1 – обеспечение эффективности выравнивания потока по сечению ГВТ ( $X_i < 1,1$ );
- 2 – снижение потерь динамического напора за счет профилирования ГВТ ( $\Delta P_{\Sigma} / P_{ВХ} < 0,25$ );
- 3 – оптимизация распределения газового потока по ГВТ и каналам плазмотрона.

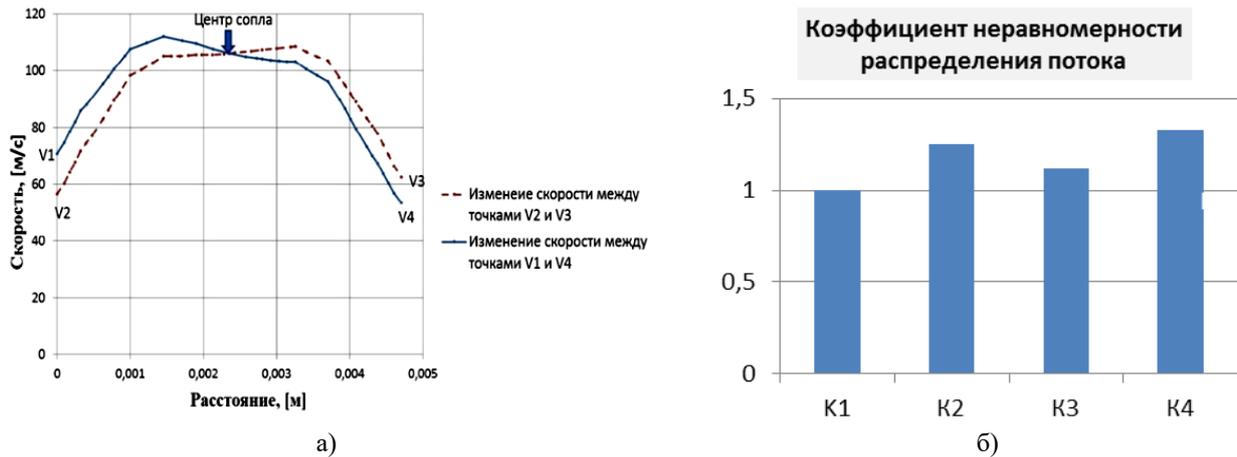


Рисунок 7 – Неравномерность распределения потока по сечению ГВТ ПМВР-М:  
 а) скорости по контрольным линиям; б)  $K_i = V_i/V_1$  в фиксированных точках

Принципы и методы проектирования для отдельных участков ГВТ плазмотронов (рис.3):

Участок 1 (область подачи ПОГ в области формирования плазменной дуги (струи)). Принцип и метод проектирования - снижение газодинамических потерь, осесимметричная подача ПОГ в систему ГВС.

Участок 2 (область выравнивания потока ПОГ по сечению ГВТ). Принципы и методы проектирования - выравнивание распределения потока газа по сечению ГВТ перед входом в завихритель за счет системы газодинамических фильтров, разработки схем подачи ПОГ и оптимизации геометрии расширительной камеры.

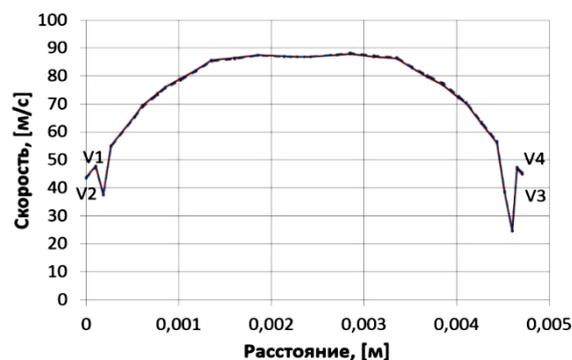
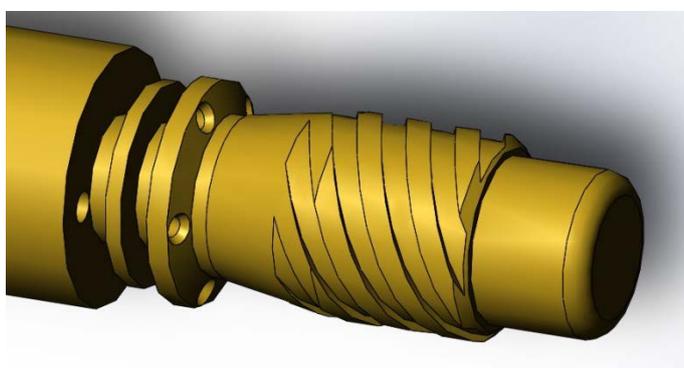
Участок 3 (область формирования закрученного потока газа для обжата и стабилизации электрической дуги). Принципы и методы проектирования – снижение газодинамических потерь, оптимизация геометрии завихрителя (длина, количество каналов, площадь сечения, шаг винта, форма входных и выходных сечений каналов), профилирование элементов сопряжения участков ГВТ, уменьшение степени турбулентности.

Участок 4 (область формирования потока плазмы). Принципы и методы проектирования – сопряженное (катод-сопло-завихритель) профилирование соплового узла для максимального обжата и стабилизации электрической дуги, создания условий для перемещения приэлектродных участков дуги по поверхности электродов, снижения турбулентных пульсаций (вероятности шунтирования и резонансного акустического излучения), формирования газодинамического и акустического профилей плазменной струи.

С учетом сформулированных принципов газодинамического проектирования была модернизирована конструкция зоны выравнивания потока газа (участок 2 ГВТ, рис.3). Для этого было предложено и исследовано 2 способа:

- изменение объема расширительной камеры;
- установка газодинамических фильтров (стенки или стенки с отверстиями) на пути течения потока газа.

Был проведен анализ различных вариантов конструкции расширительной камеры, позволивший найти оптимальные параметры её объема, расположения преграды в виде плоской стенки или стенки с фаской, а также перфорированной стенки с точки зрения эффективности выравнивания потока ПОГ. Оптимизированная конструкция ГВТ была использована при проектировании плазмотрона ПМВР-2М. Представленные на рис.8 и в табл.1 результаты расчетов свидетельствуют о существенном повышении эффективности выравнивания потока в новом плазмотроне.



а)

б)

Рисунок 8 – Модернизация газового тракта плазмотрона ПМВР-2М:

а) схема ГВТ с системой выравнивающих фильтров (сплошной и перфорированной стенками в расширительной камере), б) распределения скорости потока в контрольном сечении

Таблица 1. Сравнительный анализ эффективности выравнивания скоростей потока ПОГ различных конструкций плазмотронов

Плазмотрон	$K_2=V1/ V2$	$K_3=V1/ V3$	$K_1=V1/ V4$
ВПР-402	1.2	1.24	1.66
ПМВР-М	1.25	1.17	1.33
ПМВР-2М	1.06	1.05	1.09

В целях улучшения показателей эффективности и безопасности технологии плазменной резки металлов в работе представлена и проанализирована модель плазмотрона серии ПМВР-5, при проектировании которого был использован принцип двойного вихревого обжата дуги за счет распределения плазмообразующего газа на 2 потока (формирующий струю и стабилизирующий дугу по принципу двойного сопла). Подобный принцип использован в технологии «точной» или «сжатой» плазмы (продукция фирм Kjellberg, Hypertherm и MesserGreisheim) и в отечественном исполнении получил название «узкоструйной плазмы». В данной схеме вторичный фокусирующий поток газа подается под углом к оси плазменной горелки, интенсивно охлаждая столб дуги, благодаря чему при удалении от сопла диаметр столба дуги несколько уменьшается. При этом высокая концентрация плазменного потока достигается при сравнительно малой скорости истечения, позволяя получить

остроконечную плазменную дугу при малых токах. На основе газодинамического анализа потоков ПОГ в представленной схеме были определены факторы и методы проектирования по газодинамическим, тепло- и электрофизическим критериям, а также с учетом фактора безопасности, предложена и проанализирована конструкция узкоструйного плазмотрона ПМВР-5.2 (рис. 9).

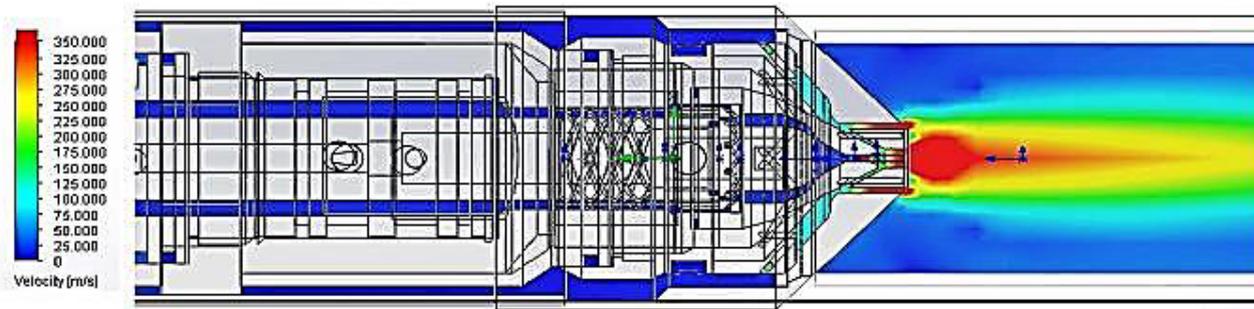


Рисунок 9 – 3D-проектирование газодинамических процессов в плазмотроне ПМВР-5.2

В процессе поиска нового эффективного способа газовихревой стабилизации была предложена и исследована конструкция плазмотрона ПМВР-3М с модифицированным ГВТ канала формирования потока ПОГ. На участке ввода газа I (рис.10) в ГВТ данного плазмотрона происходит равномерное разделение потока на 2 центрально-симметрично расположенных цилиндрических канала (участки I и II), обеспечивающих последующий симметричный относительно оси плазмотрона ввод ПОГ в зону подготовки и выравнивания потока ПОГ (участки II-V) перед входом в сопловой узел (участок VI). Данная часть ГВТ включает в себя расширительную камеру смешения потоков (КС) на участке II, предварительный (формирующий) завихритель (ФЗ) на участке III, 2-ю расширительную камеру на участке IV и 2-й стабилизирующий завихритель (СЗ) на участке V.

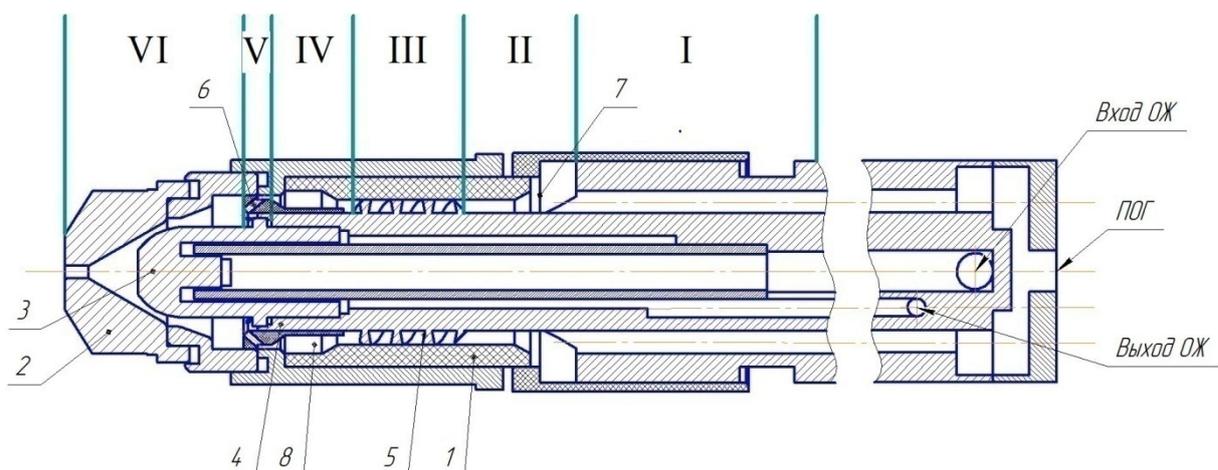


Рисунок 10 – Конструктивная схема плазмотрона ПМВР-3М с двумя завихрителями в системе газовихревой стабилизации (ОЖ – охлаждающая жидкость, 1- изолятор, 2 – сопло, 3 – катод, 4 – контур системы охлаждения, 5 – предварительный (формирующий) завихритель, 6 – основной (стабилизирующий) завихритель, 7 – 1-я расширительная камера (камера смешения), 8 – 2-я расширительная камера)

Для данной конструкции была проведена оптимизация системы газовихревой стабилизации с точки зрения взаимного расположения предварительного (формирующего) и основного (стабилизирующего) завихрителей – участки III-V

(рис.10). Расчет скоростей производился по средней линии кольцевого сечения 2-й расширительной камеры после завихрителя (рис.11). В результате было установлено, что по сравнению с рассмотренной ранее схемой с асимметричной подачей газа по одному каналу (например, для плазмотрона ПМВР-М) использование новой системы газовихревой стабилизации приводит к значительному выравниванию потока ПОГ перед входом в основной (стабилизирующий) завихритель.

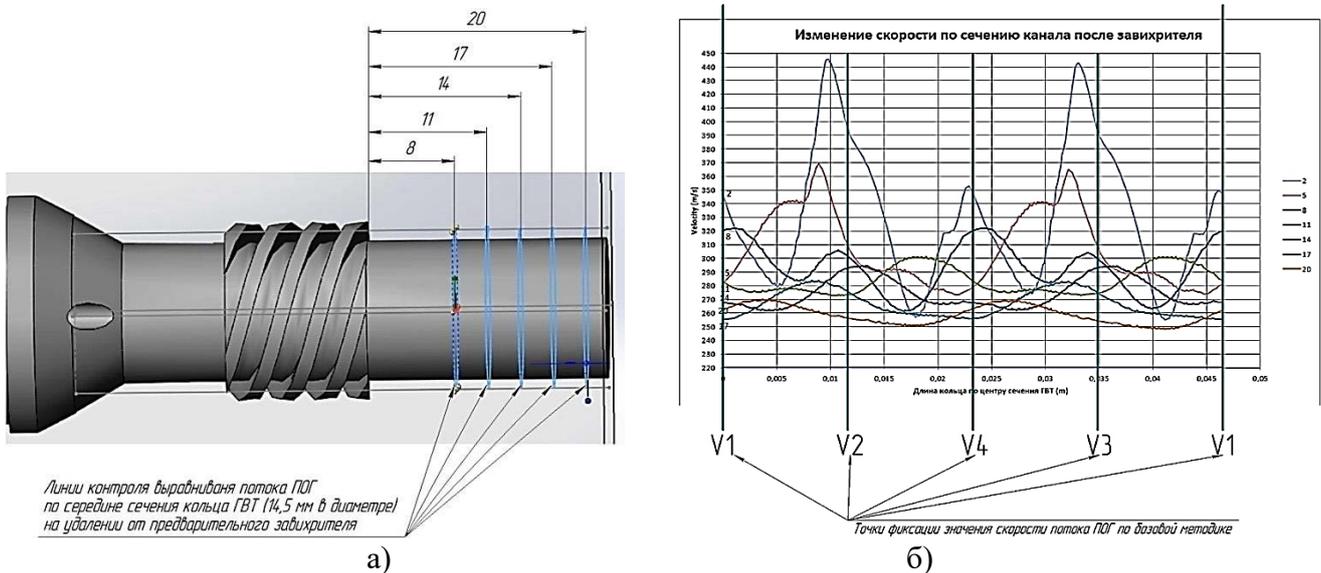


Рисунок 11 – Схема (а) и результаты расчета скоростей (б) в контрольных сечениях второй расширительной камеры плазмотрона с двумя завихрителями в системе ГВС

Расчетным путем было также выявлено влияние температуры плазменной дуги на равномерность распределения потока ПОГ, приводящее к незначительному (в пределах 10 %) снижению эффективности газовихревой стабилизации дуги (рис.12) при закономерном увеличении скорости потока газа в разогретом дугой сопловом канале плазмотрона.

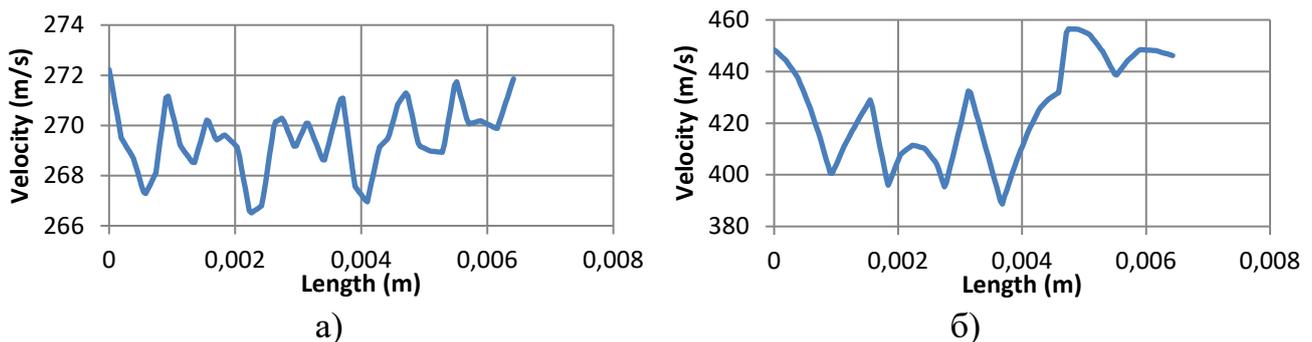


Рисунок 12 – Распределение скорости ПОГ по сечению ГВТ в контрольной плоскости плазмотрона ПМВР-2М (диаметр сопла 3 мм, расстояние от среза сопла 4 мм):  
а) в отсутствии плазменной дуги, б) при плазменной воздушной дуге ( $T=7000$  К).

С учетом требований системного подхода при проектировании был также проведен анализ особенностей проектирования металлорежущих плазмотронов по теплофизическим критериям. Было установлено, что системы охлаждения плазмотронов для резки позволяют осуществлять свободную прокачку теплоносителя в заявленных технологических режимах. В расчетах зависимых от давления параметров охлаждения потери напора теплоносителя по тракту водяного

охлаждения можно не учитывать. Эффективное охлаждение катодного узла для данных плазмотронов достигается при скоростях подачи охлаждающей жидкости в катодный узел  $V > 4$  м/с в режиме развитой турбулентности ( $Re > 20\ 000$ ). Следует также выбирать катод с геометрией, обеспечивающей минимальную плотность теплового потока на максимально возможной площади водяного охлаждения. Для эффективного охлаждения сопла достаточно использовать газовихревую систему стабилизации плазменной дуги с максимально допустимыми скоростями подачи ПОГ в сопловую узел из завихрителя.

В результате были предложены конструкции плазмотронов для резки, спроектированные с учетом сформулированных газодинамических и теплофизических принципов. Для резки металлов больших толщин рекомендованы однопоточные плазмотроны ПМВР-2М и -3М с оптимизированными ГВТ, металлов толщиной до 30 мм – плазмотроны серии ПМВР-5, использующие двухпоточную технологию узкоструйной плазмы (рис.13). Внедрение данных плазмотронов должно способствовать улучшению параметров эффективности, качества и безопасности технологий резки металлов.

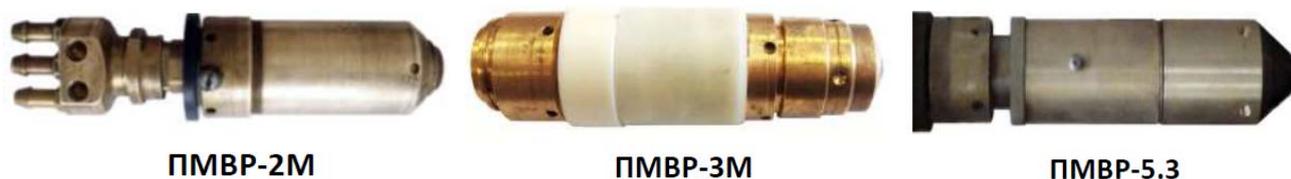


Рисунок 13 – Модернизированные плазмотроны для резки металлов

В третьей главе анализируются факторы производственной безопасности в электроплазменных технологиях.

Рассмотрение в главе 1 проблемы проектирования плазмотронов по критериям производственной безопасности показало, что данные критерии должны играть существенную роль в выборе потребителем конкретной электроплазменной технологии. Для учета фактора безопасности в процессе проектирования нужна информация, определяющая конструктивную и параметрическую взаимосвязь характеристик плазмотрона и электроплазменной технологии с уровнями шумового и электромагнитного воздействия на рабочий персонал. С этой целью был выполнен ряд экспериментальных исследований акустических и электромагнитных излучений в электроплазменных технологиях, предложена и проанализирована модель генерации шума в акустической и ультразвуковой областях спектра, сформулированы принципы и методы, учитывающие фактор безопасности при проектировании плазмотронов. Важным результатом исследований стали также конкретные конструктивные предложения, снижающие уровень негативного воздействия упомянутых выше факторов.

Для выявления и анализа источников акустического излучения определялись спектральные (уровень звукового давления (УЗД)  $L_m$  [дБ], уровень звука (УЗ)  $L_A$  [дБА]), энергетические (уровень звуковой мощности (УЗМ)  $L_p$  [дБ] и пространственные (зоны одинакового уровня шума и диаграммы направленности излучения звука) характеристики звукового поля. В процессе измерений использовался как ориентировочный метод, согласно ГОСТ 12.1.028-80, так и точные методы исследований, которые регламентируются ГОСТ 12.1.024-81 и ГОСТ

12.1.025-81. В качестве объекта изучения были выбраны проанализированные в главе 2 по газодинамическим критериям дуговые современные плазмотроны типа ПМВР-М, ВПР-410, ПЗ-400ВА, РПВ-401 и серийно выпускаемый с 80-х годов 20 века ПВР-402У4. Для сравнения был взят плазмотрон РВ S-45W производства Kjellberg (Германия).

Согласно результатам исследований, основными источниками шума в зоне плазменной резки (рис. 14) являются технологические устройства, обеспечивающие процесс плазменной разделки металла, а также отражающие поверхности и резонирующие волноводы, а также механический и гидродинамический шум. В ультразвуковой области спектра и в диапазоне высоких звуковых частот шум в зоне плазменной резки определяется основным источником его генерации – плазмотроном.



Рисунок 14 – Источники и факторы шума в зоне плазменной резки

Процессы акустической генерации существенным образом зависят от конструктивных и технологических параметров плазмотронов и электроплазменных технологий. Несмотря на конструктивное сходство, каждая из моделей плазмотронов имеет свои специфические особенности (длины отдельных участков, диаметры и площади проходных сечений, профили сопел, угол закрутки в завихрителе и т.д.), которые влияют на характер течения ПОГ, а, следовательно, и уровень аэродинамического шума. Например, изменение профиля соплового узла за счет варьирования расстояния  $L$  от среза сопла до катода приводит к появлению тональных составляющих в спектре шумоизлучения и к изменению уровня звукового давления (рис.15). Фактически, это свидетельствует о наличии резонансного механизма возбуждения дискретных тонов в области высоких (до 10 кГц) звуковых частот, определяемом геометрией ГВТ плазмотрона и, в частности, его соплового узла.

Общий уровень излучения в ультразвуковой области, как показали исследования, определяется особенностями аэродинамического струйного механизма образования шума высокоскоростными турбулентными струями. При этом появление серии дискретных тонов излучения в ультразвуковой области также может объясняться резонансными явлениями в сопловом узле плазмотрона.

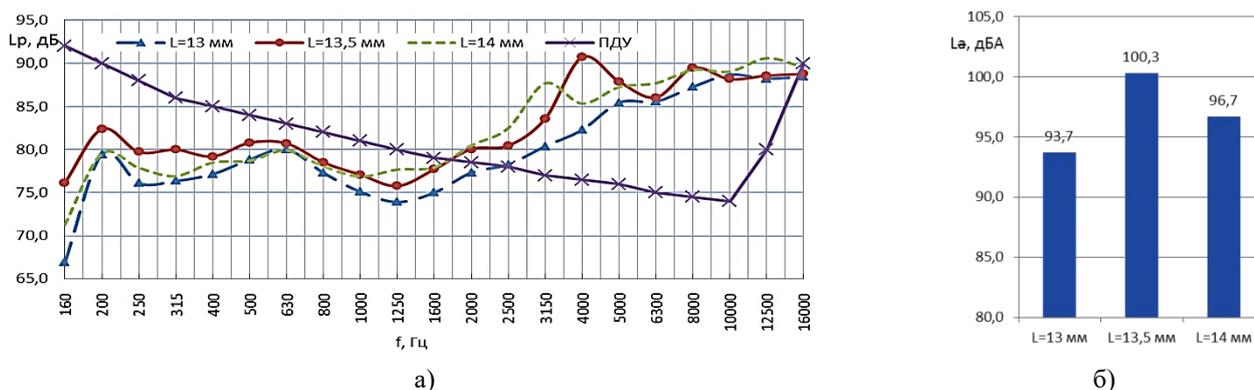


Рисунок 15 – Уровни звуковой мощности и давления плазматрона ПМВР-М в зависимости от расстояния  $L$  от среза сопла до катода (режим «холодной» струи,  $P_{вх}=0,4$  МПа, нормируемый звуковой диапазон (до 8 кГц))

Помимо конструктивных особенностей было исследовано влияние технологических факторов на излучение плазматронов. Было определено влияние температуры, давления, расхода, состава применяемого ПОГ, подводимой электрической мощности, силы тока и напряжения дуги, её полярности, рода тока. Среди других факторов, влияющих на шумоизлучение, отметим форму и длину струи, определяющих влияние отдельных участков струи на шумоизлучение (основная мощность генерируется на начальном участке струи длиной  $\sim 5$  калибров). Параметры струи ПОГ существенным образом зависят от большинства вышеперечисленных факторов. Определяющим фактором в этом случае является скорость истечения струи, требующая учета, в первую очередь, механизмов генерации высокочастотного шума при до- и сверхкритическом характере её истечения и особенностей газодинамического протекания ПОГ по ГВТ плазматрона.

Для определения основных принципов и методов проектирования, учитывающих фактор безопасности, необходимо понимание физических механизмов акустической генерации с построением соответствующей им параметрической модели. В работе представлены и проанализированы несколько моделей генерации шума.

Появление дискретных тонов в спектре шума можно объяснить с помощью теоретических моделей, связанных с механизмом резонансного самовозбуждения турбулентных пульсаций потока ПОГ на собственных частотах газовоздушного тракта плазматрона с последующей передачей энергии звуковых колебаний и их излучением из сопла плазматрона. Весь ГВТ плазматрона ПМВР в этом случае можно представить в виде механической модели колебательной системы с сосредоточенными параметрами, в которой плазмообразующий газ в расширениях обладает упругой реакцией, а в сужениях – инерционной, и её эквивалентной электрической схемы, которая может быть упрощена в пренебрежении диссипативных потерь. Анализ модели показал, что в зависимости от геометрии ГВТ в спектре излучения возможно появление 1-го или 2-х резонансных пиков или их отсутствие. Для строгого учета параметров, влияющих на шумоизлучение, следует использовать методику расчета газодинамических параметров потока плазмообразующего газа, изменяющихся по газовоздушному тракту плазматрона.

Предложенные модели позволяют определить частоты появления тональных составляющих в спектре шума  $\omega_1$  и  $\omega_2$  и звуковую мощность, генерируемую плазматроном в нормируемом диапазоне слышимых частот  $\omega$ :

$$L_p = 10 \lg \left( \frac{K_2^1 P_{10}^2 S_2}{m_1 m_2 P_0} \left| \frac{(\omega^2 - \omega_2^2)}{(\omega^2 - \omega_1^2)} \right| \cdot \left[ 4(\omega^2 - \omega_1^2)^2 + \frac{\rho^2 S_2^4 \omega^6}{4\pi^2 c^2 m_2^2} \right]^{-1} \right). \quad (6)$$

где  $P_{10} = \frac{F_0}{S_2}$ ;  $P_0 = 10^{-12}$  – пороговая звуковая мощность,  $m_1$  и  $m_2$  – акустические массы,  $\rho$  – плотность газа,  $S_2$  – поперечная площадь сужения,  $K_2^1$  – коэффициент жесткости,  $c$  – скорость звука.

Расчет по формуле (5) дает качественное согласие с экспериментальными данными (рис.16). Для уменьшения звуковой мощности, генерируемой плазмотроном в нормируемом диапазоне слышимых частот, очевидно, необходимо изменить параметры акустической системы с таким расчетом, чтобы резонансные пики были смещены в область нормируемого ультразвука (свыше 20 кГц), где допустимый УЗД составляет 110 дБ, либо уменьшены по амплитуде, или изменено соотношение акустических масс и жесткостей в системе. Наиболее рациональным решением является устранение нерегулярности площади поперечного сечения ГВТ, что позволит уменьшить действие возбуждающих сил, обусловленных пульсациями потока ПОГ, исключить условия образования и усиления звука и, тем самым, снизить «внутренний» аэродинамический шум, генерируемый плазмотроном в нормируемом диапазоне слышимых частот. Дополнительным фактором, действующим в упомянутых направлениях, может стать профилирование тракта с уменьшением соответствующих акустических масс расширений, путем снижения их объемов и площадей проходного сечения.

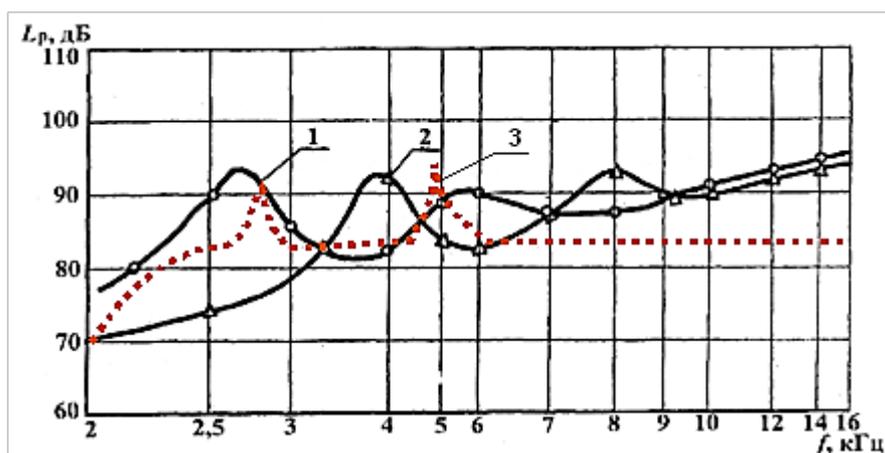


Рисунок 16 – Зависимость энергетических характеристик акустического шума плазмотрона от расстояния от среза сопла до торца катода: 1–14,7 мм; 2–14,2 мм; 3–расчет по формуле (5)

Анализ физической модели генерации звука, вызванной резонансными явлениями, происходящими внутри цилиндрической части соплового канала, позволяет оценить уровень звуковой мощности, излучаемой открытым концом сопла плазмотрона:

$$L_p = 10 \lg \frac{JS}{P_0} = 10 \lg \left[ \frac{F^2(t)}{2S\rho c P_0} \cdot \frac{\text{sh}(\ln(\pi ka))}{\left( \text{sh}^2\left(\frac{1}{2}\ln(\pi ka)\right) + \sin^2\left(kl - \frac{\pi}{4}\right) \right)} \right] \quad (7)$$

где  $J$  – интенсивность излучения [ $\text{Вт}/\text{м}^2$ ],  $P_0 = 10^{-12}$  Вт – пороговое значение звуковой мощности,  $F(t)$  – вынуждающая колебания сила [Н],  $k$  – волновое число [ $\text{м}^{-1}$ ],  $c$  – скорость звука [ $\text{м}/\text{с}$ ],  $\rho$  – плотность ПОГ в сопловом канале [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ].

Графики, представленные на рис.17, показывают удовлетворительное совпадение результатов расчета в рамках рассмотренной модели с данными

экспериментальных исследований для плазмотрона ПВР-402У4. Недостатком данной модели является невозможность учета убывания с ростом номера гармоники амплитуд дискретных составляющих спектра в области высоких ультразвуковых частот. С учетом того, что в данной области уровни звуковой мощности не превосходят нормируемого уровня, следует сделать вывод, что данная модель также позволяет с достаточной степенью объективности учесть влияние конструктивных особенностей ГВТ плазмотрона на характер и уровень ультразвукового акустического излучения.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для устранения причин, влияющих на появление дискретных составляющих акустического спектра, необходимо профилирование соплового узла плазмотрона в его прикатодной области и цилиндрическом сопловом канале. При проектировании плазмотронов нужно избегать возникновения больших объемов и минимизировать площади проходного сечения в прикатодной области соплового узла плазмотрона с одновременным уменьшением диаметра канала сопла и его длины.

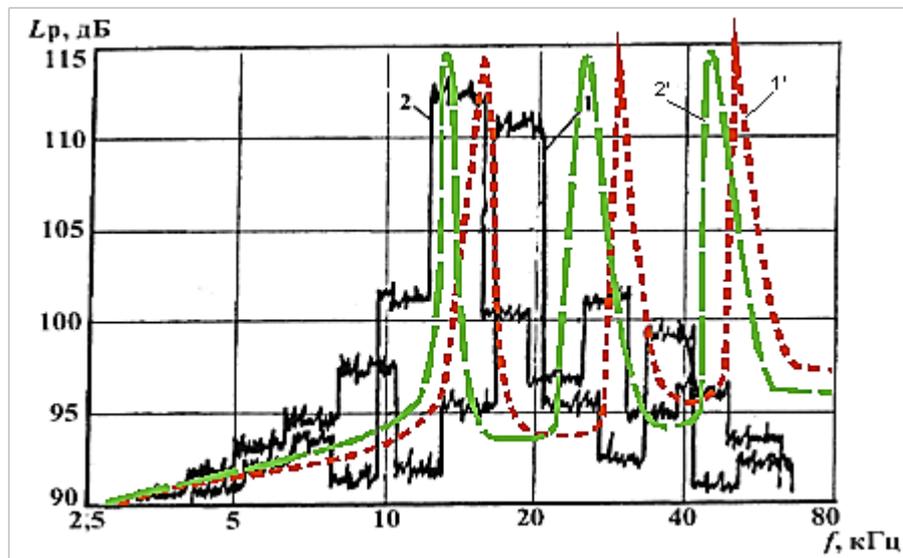


Рисунок 17 – Уровень акустической мощности плазмотрона в ультразвуковом диапазоне:  
1 – экспериментальная кривая ( $P_{вх} = 0,5$  МПа), 2 – расчет по формуле (6)

На основе анализа физических моделей оптической генерации плазменных струй было показано, что интенсивность излучения плазмотронов в оптическом диапазоне зависит от геометрии плазменной дуги (струи) и может быть снижена за счет её обжатия и стабилизации. Исходя из этого вывода, а также на основе анализа известных моделей шумоизлучения для струйного истечения, характерного для двойных сопел, был сделан вывод, что внедрение плазмотронов с двухконтурным способом подачи газа (формирующим и стабилизирующим плазменную струю ГВТ) способно снизить уровень оптического и акустического излучения, повысив тем самым безопасность их применения. При одинаковых внешних размерах двойного сопла и максимальных газодинамических параметрах потоков меньшая акустическая мощность генерируется соосными струями со скоростями истечения из внешнего сопла большими, чем из основного. Для соосных струй с противоположным соотношением скоростей пониженные уровни шумоизлучения (особенно в области высоких частот) наблюдаются для сопел с относительно широким внешним

диаметром, что связано с существенным снижением градиента средних скоростей при смещении внутреннего потока с окружающей средой и, следовательно, снижением интенсивности турбулентных пульсаций скорости.

**Четвертая глава** посвящена разработке принципов и методов проектирования плазменного оборудования по критериям производственной безопасности.

На основе анализа приведенных в главах 2 и 3 результатов были сформулированы основные принципы проектирования по критериям акустической безопасности:

1. Устранение условий для резонансного возбуждения тональных составляющих акустического спектра шумоизлучения плазмотрона за счет профилирования ГВТ ( $-1 < \lg(S_i/S_{i+1}) < 1$ ,  $S_i$  – площадь сечения  $i$ -го участка ГВТ);

2. Снижение уровня аэродинамического шума за счет формирования условий истечения плазменной струи ( $V < C_{зв}$ ).

С учетом влияния профиля ГВТ на характер шумоизлучения было разработано несколько конструкций плазмотронов с улучшенной (по шумовым характеристикам) газодинамикой течения плазмообразующего газа. При разработке малошумных плазмотронов в качестве базовых были взяты конструкции плазмотронов для резки ПМВР-М и ВПР-410. Были предложены следующие методы акустического («безопасного») проектирования плазмотронов для резки и сварки:

1. Оптимизация геометрии завихрителя, обеспечивающего минимальный размер акустического ядра плазменной струи. Исследование влияния особенностей профилирования завихрителя плазмотрона на формирование плазменной струи производилось с использованием расчетно-графического программного пакета SolidWorks и уточнялось по методике газодинамического анализа, рассмотренной в главе 2. Был произведен анализ влияния угла закрутки потока газа на параметры выходной струи газа. Для этого были рассмотрены 5 вариантов конструкции завихрителя плазмотрона диаметром 20 мм с шагом резьбы от 18 до 30 мм (через 3 мм) и найдено оптимальное значение шага завихрителя (от 21 до 27 мм), обеспечивающее стабильную форму струи плазмотрона при наибольшей протяженности её ядра с максимальной осевой скоростью.

2. Технологически возможное уменьшение диаметра сопла плазмотрона и скорости истечения струи.

3. Профилирование ГВТ плазмотрона в целях снижения степени турбулентности потока ПОГ, а также оптимизация геометрии соплового узла в целях предотвращения генерации тональных составляющих шума. Предложено и проанализировано по газодинамическими акустическим критериям несколько профилей ГВТ плазмотрона – с «эквидистантным» и «гладким» профилем ГВТ в сопловом узле, а также с сопряжено изменяющейся формой катода и соплового узла. Подобное профилирование позволяет уменьшить общий уровень шума за счет устранения причин, вызывающих появление либо дискретных пиков в спектре шумоизлучения, либо широкополосного шума.

В основе проектирования соплового узла (основного генератора тонального шума) должна стоять задача уменьшения числа источников акустического возмущения газодинамической системы и устранения условий для их резонансного усиления. Поскольку пульсации турбулентного потока ПОГ образуются в областях резкого изменения профиля проходного сечения ГВТ, необходимо исключить

возможность отрыва потока и вихреобразования в ГВТ соплового узла плазмотрона. Для уменьшения числа источников усиления таких пульсаций следует по возможности устранить камеры-резонаторы, присутствующие в сопловых узлах большинства применяемых плазмотронов. Обе эти задачи могут быть одновременно решены за счет согласованного профилирования обводов сопла и катода в форме поверхностей с постоянной или непрерывно меняющейся кривизной.

Установлено, что проектирование можно вести, выбирая в качестве базовой конфигурации, профиль сопла, либо катода. В случае проектирования по профилю соплового узла необходимо выбрать оптимальную аппроксимирующую зависимость площади проходного сечения ГВТ. При проектировании по профилю катода можно использовать любые аппроксимации площади проходного сечения ГВТ, сопрягающие площади на входе и на выходе из соплового узла.

Предложены конструкции сопловых узлов плазмотронов, спроектированные на основе профилей сопла Витошинского, а также известные в звукопередающих и вещательных системах сопла экспоненциальной и катеноидальной форм, в которых за счет характерного изменения площади проходного сечения может существенно изменяться активная составляющая акустической мощности (рис.18). Показаны их преимущества и недостатки с акустической и технологической точек зрения. В конфузорах экспоненциальной формы уменьшается энергия высокочастотного излучения, в катеноидальных – звукового диапазона. Условие сопряжения выходной площади сопла длиной  $L$  с площадью цилиндрического канала сопла  $F_1$  позволяет задать закон изменения профиля сужающегося экспоненциального сопла  $r_c$ :

$$r_c(x) = R_c \cdot \left(\frac{r_0}{R_c}\right)^{\frac{x}{L}} \quad (8)$$

где  $x$  – расстояние от начала соплового узла,  $R_c$  – радиус основания сопла (на входе),  $r_0$  – радиус цилиндрической части сопла (в критическом сечении).

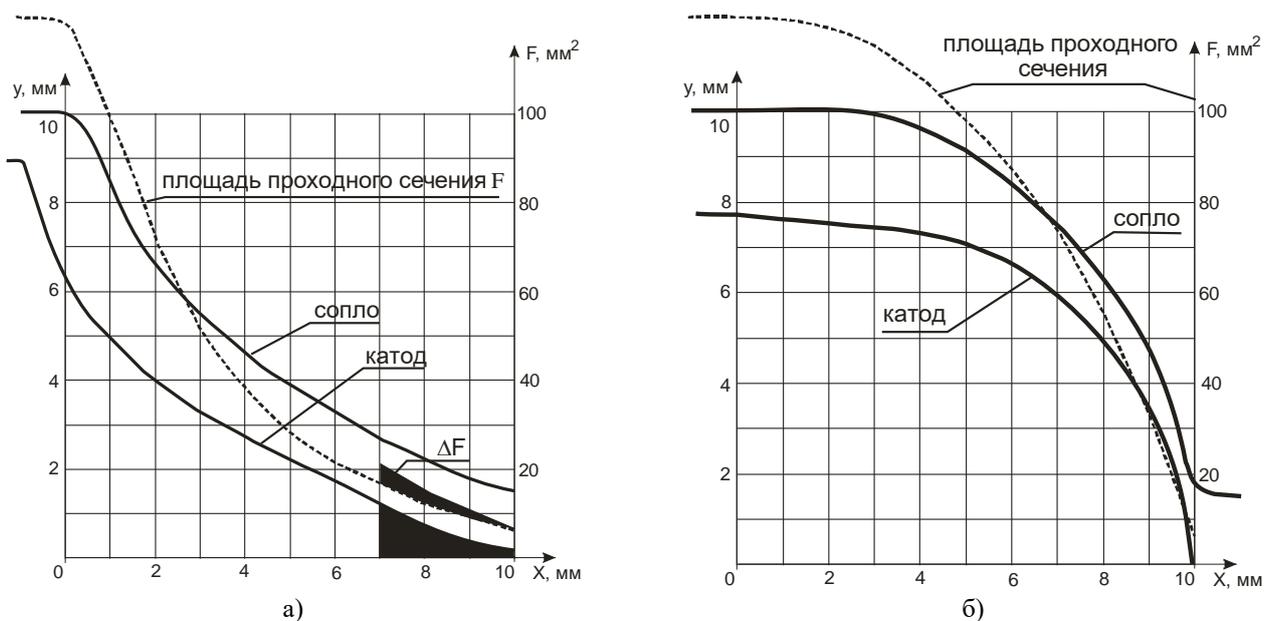


Рисунок 18 – Профили сопловых узлов, спроектированных на базе: а) экспоненциального, б) катеноидального профилей сопла,  $\Delta F$  – изменение площади в случае выгорания катодной вставки.

В случае проектирования узла на базе катеноидального конфузорного узла профиль сопла будет изменяться по закону:

$$r_c(x) = R_c \cdot \sqrt{2 - \text{ch}^2(\beta x)} = R_c \cdot \sqrt{1 - \text{sh}^2(\beta x)}. \quad (9)$$

$$\beta = \frac{1}{L} \cdot \text{arch} \left( \sqrt{2 - \frac{F_1}{F_c(0)}} \right) = \frac{1}{L} \cdot \text{arsh} \left( \sqrt{1 - \frac{F_1}{F_c(0)}} \right), \quad (10)$$

где  $F_c(0)$  – площадь сечения соплового узла в начале отсчета.

Для случаев профилирования соплового узла по профилю катода предложены параболическая аппроксимация для конусного катода с линейно изменяющимся профилем и эллиптическая для катода с эллиптически изменяющимся профилем катодной поверхности (рис.19). Профили сопловых узлов требуют коррекции по теплофизическим, материаловедческим и технологическим критериям. В случае проектирования по профилю сопла такие корректировки несущественно влияют на характер изменения площади сечения ГВТ. Для сопловых узлов, спроектированных по профилю катода, возникает скачок площади в области катодного торца, требующий дополнительной корректировки выходного канала соплового узла и режимов работы плазмотрона. Показано несущественное влияние технологических изменений профиля катода (выгорание катодной тугоплавкой вставки) в процессе работы плазмотрона на его акустические характеристики.

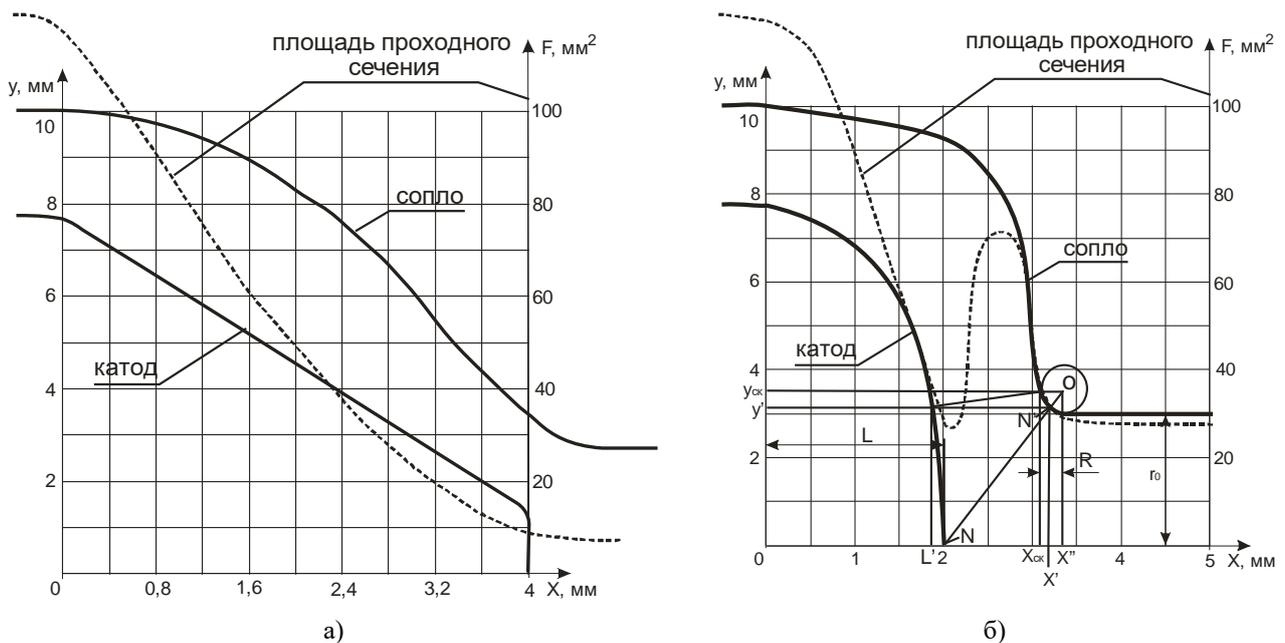


Рисунок 19 – Профили сопловых узлов, спроектированных на базе: а) конусного, б) эллиптического катода

Предложенные методы проектирования сопловых узлов плазмотронов позволяют избежать резких перепадов площади проходного сечения ГВТ, и, следовательно, снизить вероятность появления тональных шумов в акустическом спектре плазмотрона. Однако, профилирование ГВТ в области завихрителя и катододержателя способно повлиять на форму и стабильность плазменной струи, а следовательно, на характер излучения широкополосного аэродинамического шума.

В **пятой главе** представлена диагностика электроплазменных технологий и процессов по критериям эффективности, качества и безопасности.

Оценка достигнутых в ходе проектирования результатов – необходимый этап процесса разработки и внедрения в производство новых устройств и технологий. В качестве критериев результативности проектирования для плазменных технологий должны выступать рассмотренные в главе 1 параметры эффективности, качества и безопасности. Помимо экспериментального сравнения плазмотронов были по известным методикам проведены теоретические оценки параметров проектирования, позволившие сделать выводы о полноте и точности рассмотренных в ходе данной работы методик оценки ряда технологических параметров плазменных технологий.

Сравнительный теоретический анализ эффективности проектирования по газодинамическим критериям показал, что за счет профилирования ГВТ у плазмотронов типа ПМВР-2М улучшены на 5-7 % газодинамические показатели струи и вольтамперные характеристики дуги. В случае применения технологии узкоструйной плазмы эффективность работы может быть улучшена на 15-20 % по сравнению с серийными (базовыми) моделями плазмотронов для резки. Газодинамические параметры в сопловом узле плазмотрона можно оценивать по приближенным аппроксимирующим формулам, предложенным в работе. Например, для плазмотронов однопоточной схемы можно использовать универсальные аппроксимации (точность 15-20 %):

$$\Delta P_{\Sigma} = 0,21 \cdot P_{\text{вх}}^{0,5} \cdot Q^{1,8} \quad \text{и} \quad \Delta P_{\Sigma} = 0,11 \cdot P_{\text{вх}}^{-0,75} \cdot G^{1,64 \cdot P^{0,08}} \quad (11)$$

где  $[P_{\text{вх}}]$  и  $[\Delta P_{\Sigma}] = \text{атм}$ ,  $[Q] = \text{л/с}$ ,  $[G] = \text{г/с}$ .

Эффективность работы анализируемых плазмотронов также была теоретически оценена по диапазонам критических для работоспособности и шумовой безопасности параметров – критической мощности нагнетания ПОГ, соблюдению условий газовихревой стабилизации и условию сверхкритического истечения плазменной струи. В результате были выявлены заметные преимущества плазмотрона ПМВР-5.2, обусловленные существенным снижением общего количества потерь из-за специфики конструкции завихрителя.

Представленные на рис.20 сравнительные показатели эффективности работы, полученные в ходе экспериментального определения оптимальных режимов резки стали 09Г2С толщиной 10 мм, свидетельствуют о повышении энергоэффективности модернизированных плазмотронов ПМВР-2М и ПМВР-5.3 на 30-50 %, а также скорости резки в 2,4 раза узкоструйного плазмотрона ПМВР-5.3 по сравнению с базовым плазмотроном ПМВР-М. Кроме того, показатели энергоэффективности и скорости резки сопоставимы или превосходят показатели, характерные для плазмотрона Kjellberg S-45. Это позволяет говорить об экспериментальном подтверждении достигнутого в ходе проектирования повышения эффективности новых модернизированных плазмотронов, которое существенно превышает теоретические оценки.

Ввиду ограниченности имеющихся сведений, отдельное внимание было уделено экспериментальному исследованию качества поверхности реза после воздушно-плазменной и газо-кислородной резки на соответствие требованиям ГОСТ 14792-80 по параметрам газосодержания и микроструктуры в приповерхностной области реза. Анализ по водороду производился на RH-404 анализаторе по методу измерения коэффициента теплопроводности, зависящего от концентрации газа, выделившегося в процессе плавления образца. Содержание азота определялось подобным методом на

ТС-600 анализаторе с параллельным исследованием содержания кислорода с помощью датчика инфракрасного излучения. Было выяснено, что состав плазмообразующего газа влияет на качество плазменной резки. При плазменной резке наблюдается меньшая степень пористости и большая равномерность структуры поверхности реза и зоны термического влияния в сравнении с газокислородной. При газовой и плазменной разделке низкоуглеродистых сталей присутствует повышенное газосодержание в околошовной области с преобладанием нитридосодержащих компонент при ручной плазменной резке и оксидосодержащих при газовой разделке стали. В этой связи целесообразно применять автоматизированные технологии плазменной резки, обеспечивающие высокие показатели эффективности и качества реза, например, технологию сжатой или узкоструйной плазмы.

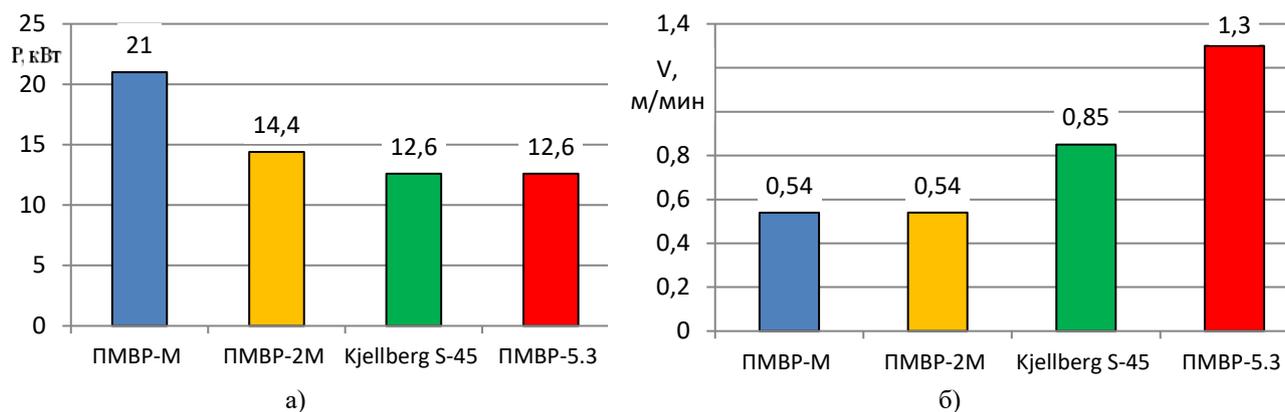


Рисунок 20 – Экспериментальное определение оптимальных режимов резки исследуемых плазматронов: а) потребляемая мощность, б) скорость резки

Сравнительный анализ качества плазменной резки металлов был выполнен на прямых и косых резах на стали 09Г2С. В ходе исследований было проведено определение геометрических параметров реза, исследование рельефа поверхности реза, описание микроструктуры и определение твердости по Виккерсу.

По результатам исследований были установлено, что качество резки плазматроном ПМВР-М соответствует первому и второму классам точности по ГОСТ 14792-80.

Результаты измерений, показали, что на вертикальном резе, выполненном плазматроном ПМВР-М наблюдается отклонение от перпендикулярности с величиной  $\Delta$  равной 0.8-1.1 мм ( $5-7^\circ$ ), в то время как на образцах, полученных с применением плазматрона ПМВР-2М величина  $\Delta$  составляет 0.2-0.5 мм ( $1-3^\circ$ ). При выполнении реза под углом для плазматрона ПМВР-2М значения отклонения углового размера ближе к значениям первого класса точности по сравнению с образцами, полученными плазматроном ПМВР-М, что связано с повышенной эффективностью стабилизации плазменной дуги. При использовании узкоструйного плазматрона ПМВР-5.2 отклонение от перпендикулярности в пределах от  $1^\circ 30'$  ( $\Delta \leq 0,25$  мм) на одной и в пределах  $5^\circ 50'$  ( $\Delta \leq 0,9$  мм) на другой кромке вертикального реза, что соответствует 1-му и 2-му классу качества по ГОСТ 14792-80. Угловые значения косых резов также в пределах допуска  $5^\circ$  соответствуют требованиям СТО Газпром 2-2.2-136-2007.

Для плазматрона ПМВР-2М радиус верхней кромки на вертикальном резе меньше на 0.1 мм, чем у плазматрона ПМВР-М (0,9 мм против 1.0 мм), что связано с

уменьшением мощности при резке с 21 кВт (ПМВР-М) до 14 кВт (ПМВР-2М). При этом радиус закругления верхней кромки реза для всех плазматронов соответствует требованиям ГОСТ 14792-80 (не более 2 мм). За счет снижения мощности нагрева уменьшается и деформация заготовок (в пределах 2 мм при резке плазматроном ПМВР-М и менее 0.2 мм при использовании плазматрона ПМВР-2М).

По этой же причине на ряде образцов, полученных плазматроном ПМВР-2М глубина ЗТВ находится в пределах 0,50-0,55 мм, что меньше средних величин, которые для плазматронов ПМВР-М и ПМВР-2М составили от 0,7 до 0,9 мм (соответствует второму классу качества по ГОСТ 14792-80). Толщина зоны термического влияния (ЗТВ) при резке плазматроном ПМВР-5.3 существенно меньше и составляет до 500 мкм для всех образцов. Меньшее тепловложение приводит и к уменьшению величины твердости прилегающих зон к поверхности реза на заготовках полученных плазматроном ПМВР-2М, чем у аналогичных образцов, полученных плазматроном ПМВР-М. Результаты замеров твердости образцов, полученных при резке плазматроном ПМВР-5.2 свидетельствует о том, что небольшое отклонение от требований СТО Газпром 2-2.4-083 ( $HV \leq 300$  для ЗТВ) наблюдается лишь в поверхностной зоне на глубинах менее 100-150 мкм, что позволяет при дальнейшем использовании полученных после резки швов под сварку не производить дополнительные операции по её механическому удалению.

Полученные данные по шероховатости кромок реза (5-10 мкм) соответствуют 1-му классу качества (ГОСТ 14792-80) для ПМВР-М и ПМВР-2М с минимальным значением 5 мкм, полученным при использовании плазматрона ПМВР-2М. При этом средние значения шероховатости при резке плазматроном ПМВР-5.2 существенно ниже – 3-7 мкм, что также соответствует 1-му классу качества по ГОСТ 14792-80.

Таким образом, качество резки плазматроном ПМВР-М соответствует первому и второму классам точности по ГОСТ 14792-80. Качество резки плазматроном ПМВР-2М соответствует первому классу точности по ГОСТ 14792-80 и сопоставимо с качеством резки плазматроном РВ-S 45W (Kjellberg) за счет уменьшения тепловложения и последующего снижения величин остаточных напряжений и деформаций. Качество разделочных швов, полученных с применением нового узкоструйного плазматрона ПМВР-5.3 – на уровне 1-го класса по ГОСТ 14792-80, что превышает качество, достигаемое большинством отечественных плазматронов, и сопоставимо с качеством резки зарубежными плазматронами, использующими аналогичный принцип стабилизации газа, а также с качеством при лазерной резке металлов сопоставимых толщин.

В связи с тем, что применение плазменной резки металлов в технологии производства сварных соединений, как правило, сопровождается операциями механической обработки поверхностей разделочных швов, для повышения эффективности сварочных технологий актуальной задачей становится разработка и внедрение плазматронов, позволяющих производить резку металлов под сварку без последующей процедуры механического удаления зон термического влияния (ЗТВ). В рамках представленной работы выполнен комплекс сравнительных исследований, направленных на определение влияния конструкций плазматронов на эксплуатационные свойства полученных после резки сварных соединений.

Исследования проводились на стали 09Г2С толщиной 10 мм. Резка под сварку производилась с разделкой кромок под углом 60° (режимы резки – в табл.2). После

резки и подготовки шва без удаления ЗТВ поверхностей реза производилась его механизированная сварка с использованием сварочной омедненной проволоки ОК-Autrod 12.51 (аналог 1,2 Св-08Г2С-О) в защитном газе К18 (18% CO<sub>2</sub>, 82% Ar).

Таблица 2. Режимы резки образцов под сварку

№ серии	Плазмотрон	Режим резки				
		Ø, мм	I, А	U, В	V, м/мин	P, МПа
1	ПМВР-М	2,5	105	200	0,54	0,45
2	Kjellberg S-45	1,4	90	140	0,85	0,5
3	Механическая резка	-	-	-	-	-
4	ПМВР-2М	2	80	180	0,5	0,5
5	ПМВР-5.3	1,6	90	140	1,3	0,5

Ø – диаметр сопла, V – скорость резки, P – давление плазмообразующего газа (ПОГ) на входе в плазмотрон.

Сварку контрольных пластин выполняли согласно требованиям, представленным в РД 153-006-02 и СТО Газпром 2-2.2-136-2007. Режимы сварки – 17 В, 120 А (1-й проход, корень шва), 19 В, 150 А (2-й проход, заполняющий), 19 В, 150 А (3-й проход, лицевой). Предварительно разделанные плазменной резкой кромки шва сваривались механизированным образом на инверторном источнике питания Шторм-Лорх S5 без удаления ЗТВ по аналогичной технологии. Испытания сварных швов проводились в соответствии с нормативными документами, регламентирующими проведение сварочных работ при изготовлении трубопроводов – РД 26-11-08-86 и РД 153-006-02, а также ГОСТ 6996-66. Испытания на статическое растяжение были проведены в ЦЗЛ ПАО «Уралмашзавод», микроструктурные исследования, а также испытания на статический и ударный изгиб в зоне сварного шва и ЗТВ – в ИМАШ УрО РАН.

Как показали исследования, показатели прочности и пластичности сварных швов, полученных после разделки проката с применением плазменных методов без удаления ЗТВ, удовлетворяют нормативным требованиям, предъявляемым к сварным соединениям и, в случае применения новых (ПМВР-2М и ПМВР-5.3) плазмотронов, сопоставимы со значениями, достигаемыми при подготовке кромок под сварку механическим способом (рис.21). В процессе эксперимента на большинстве образцов разрыв происходил не в области сварного шва, а по основному металлу, что свидетельствует о более высоких значениях прочности сварного шва.

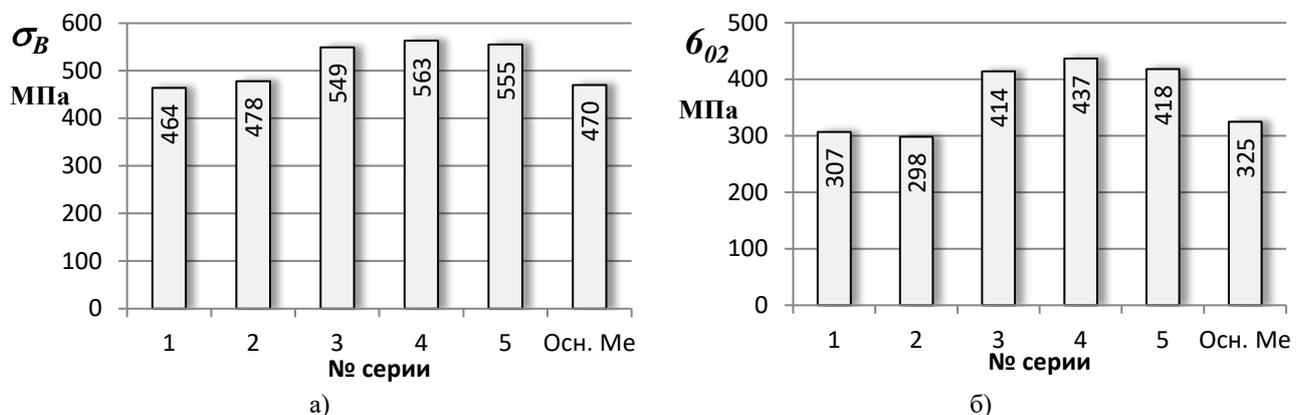


Рисунок 21 – Анализ прочности и пластичности сварных швов после плазменной резки:  
а) временное сопротивление разрыву, б) предел текучести условный

Результаты проведенных испытаний плоских образцов со сварным швом на статический изгиб свидетельствует об отсутствии значимых различий в величинах определяемого по ГОСТ 6996 угла загиба ( $91,5-94,0^\circ$ ) для различных серий образцов, значения которого не превышают нормативных требований ( $\alpha_{\min} \geq 80^\circ$  по стандарту ПБ 03-576-03). Кроме того, фактически отсутствуют отличия и в характере реакции исследуемых образцов на нагрузку (в области перехода от упругой к пластической деформации).

Результаты испытаний образцов на ударную вязкость по сварному шву и ЗТВ показали превышение значений  $KCV^{+20}$  по сравнению со значениями, характерными для основного металла, а также существенное превышение нижнего порога нормативных требований, предъявляемых к основному металлу. В зонах термического влияния меньше всего по величинам  $KCV$  от значений основного металла отличаются образцы, полученные после резки новыми плазмотронами ПМВР-2М и ПМВР-5.3. Данные фрактографического анализа подтверждают сделанные по диаграммам разрушения выводы, что в области сварного шва, как правило, наблюдается хрупко-вязкий излом (доля вязкой составляющей  $\varepsilon - 55 \div 70 \%$ ), а в области ЗТВ преобладает вязкое разрушение ( $\varepsilon \geq 70 \%$ ). Сварные соединения, полученные после резки новыми плазмотронами (рис.22), имеют, в целом, более высокие значения доли вязкого излома ( $\varepsilon - 60 \div 65 \%$  в СШ), чем при резке базовым плазмотроном ПМВР-М и плазмотроном Kjellberg S-45 ( $\varepsilon - 55 \div 60 \%$ ), близкие по значениям к показателям, достигаемым после механической резки ( $\varepsilon = 70 \%$ ).

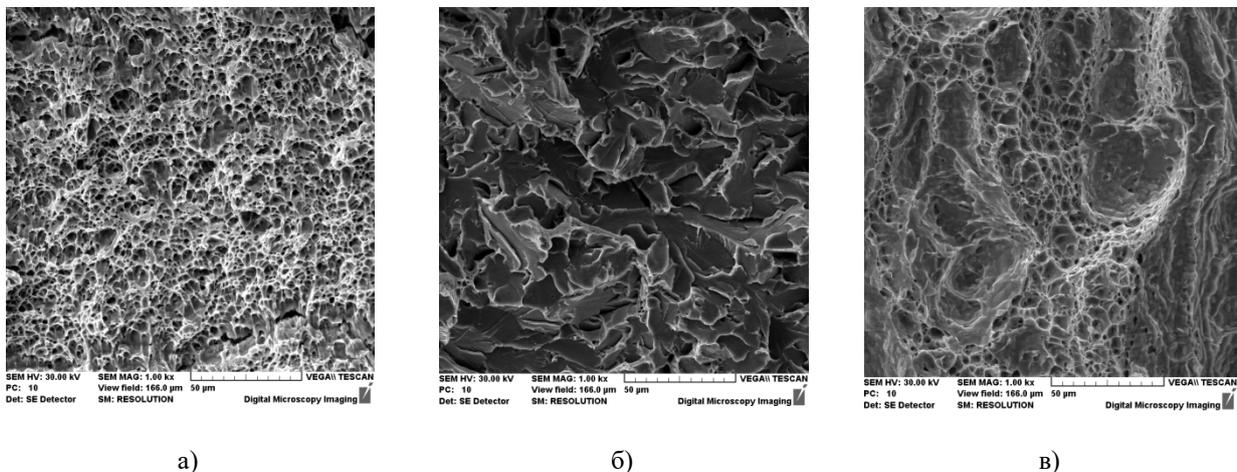


Рисунок 22 – Фото изломов образцов (№ 5 – ПМВР-5.2) после испытаний на ударную вязкость: а) вязкий излом в зоне сварного шва (СШ) с  $\varepsilon = 60 \%$ , б) смешанный излом в СШ с  $\varepsilon = 60 \%$ , в) смешанный излом в ЗТВ  $\varepsilon = 80 \%$

Анализ результатов измерений твердости показал соответствие всех исследованных образцов требованиям СТО Газпром 2-2.4-083 ( $HV_{10} \leq 255$  для металла шва и  $HV_{10} \leq 300$  для ЗТВ). При этом наиболее качественные (по показателям отличия от средних значений и твердости основного металла) швы достигнуты при сварке образцов, полученных резкой новыми плазмотронами ПМВР-2М и ПМВР-5.3. Значения твердости по высоте сварных швов, полученных по режимам № 4 и 5, практически одинаковы, что позволяет ожидать равную прочность материала этих соединений по всей ширине пластины. Качество данных швов по показателям твердости не уступает показателям, достигаемым после механической резки. В

исследованиях подтверждены выводы микроструктурного анализа, предсказывающего сочетание высоких прочностных свойств с показателями пластичности сварных швов, полученных при механической резке и разделке с применением новых плазменных технологий.

Результаты исследования свойств сварных соединений свидетельствуют о возможности подготовки заготовок под сварку без предварительного механического удаления слоя металла кромки реза за счет применения ряда модернизированных отечественных плазмотронов (включая созданные в рамках данной работы).

Анализ результатов проектирования по принципам безопасности свидетельствует о достигнутых преимуществах в борьбе с шумовым фактором. У профилированного плазмотрона ПМВР-2М отсутствуют тональные составляющие в спектре излучения, а узкоструйный плазмотрон ПМВР-5.2 показывает максимальное снижение уровня звукового давления на 10-12 дБ в диапазоне 125-500 Гц, что позволяет уменьшить область сверхнормативного излучения на 1/3 октавы. Суммарный уровень звуковой мощности плазмотронов ПМВР-5.2 и ПМВР-5.3 на 4-6 дБА меньше, чем у ПМВР-М и сопоставим с одним из наиболее эффективных зарубежных плазмотронов Kjellberg PB S-45W (рис.23). Подтверждено, что применяемая в узкоструйной технологии резка на соплах меньшей длины и диаметра позволяет снизить общий уровень звуковой мощности в ультразвуковой области, а также интенсивность оптического излучения в видимом и ультрафиолетовом диапазоне. Средняя интенсивность излучения в оптическом диапазоне у плазмотрона ПМВР-5.2 меньше, чем у базовых плазмотронов и сопоставима с Kjellberg PB S-45W. На 50 лк меньше уровень излучения в оптическом диапазоне и у плазмотрона ПМВР-2М (в сравнении с базовым плазмотроном).

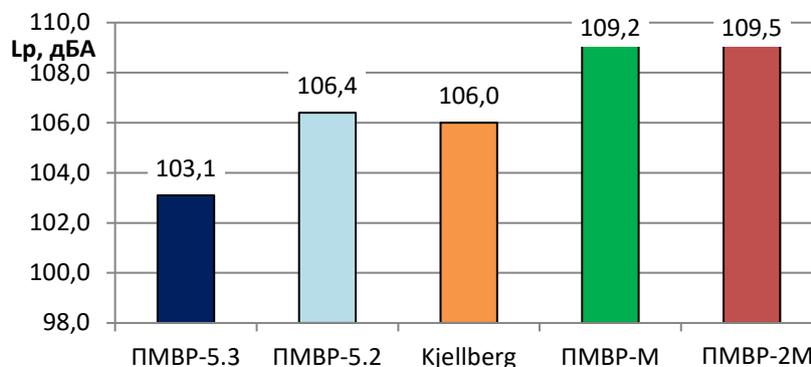


Рисунок 23 – Уровень звуковой мощности плазмотронов для резки в звуковой области

Внедрение узкоструйной технологии плазменной резки позволяет получить существенный экономический эффект по сравнению с другими видами (механической, газовой и т.д.). Помимо этого следует учесть пониженное энергопотребление и повышенную надежность плазмотрона, улучшенные показатели качества и безопасности его работы.

В связи с тем, что в настоящее время фактически отсутствует регламент, обеспечивающий процедуру комплексного исследования результативности проектирования по критериям эффективности и методика сравнительного интегрального анализа плазмотронов для интегральной оценки полученных результатов был предложен метод квалиметрического анализа, адаптированный к технологии плазменной резки. За основу такого анализа был взят регламент

испытания параметров качества и безопасности технологии плазменно-дуговой резки металлов, предложенный в данной работе. В качестве основных параметров на первой стадии сравнения были выбраны производительность (скорость резки) и энергоэффективность (потребляемая мощность). На второй стадии сравнивались параметры качества резки металлов и характеристики сварных швов, полученных после плазменной резки под сварку. На третьей стадии испытаний основное внимание было уделено сравнительному исследованию параметров безопасности плазменной резки.

При сравнительном анализа различных свойств, измеряемых в разных по размаху и размерности шкалах, используется относительный безразмерный показатель  $K_i$  (от -1 до +1), отражающий степень приближения абсолютного показателя свойства  $Q_i$ , к среднему значению для рассматриваемого свойства (параметра)  $\langle Q_i \rangle$ :

$$K_i = (Q_i - \langle Q_i \rangle) / Q_m, \quad (12)$$

$$\langle Q_i \rangle = (\max\{Q_i\} + \min\{Q_i\}) / 2, \quad (13)$$

$$Q_m = (\max\{Q_i\} - \min\{Q_i\}) / 2, \quad (14)$$

где  $\max\{Q_i\}$  и  $\min\{Q_i\}$  – максимальное и минимальное значение числового показателя  $Q_i$  для рассматриваемого свойства.

Для нормировки коэффициентов в диапазоне от 0 до 1 вводят дополнительный коэффициент  $L_i$ , определяемый через  $K_i$  простым арифметическим сдвигом:

$$L_i = (S_i \cdot K_i + 1) / 2, \quad (15)$$

где  $S_i$  – знак (положительный или отрицательный), определяющий вклад каждого из свойств в суммарную эффективность устройства.

С учетом всех сделанных определений интегральный показатель эффективности можно представить в виде некоторой функции  $L = F(L_i)$ , которая, как правило, задаётся суммой вида:

$$L = \sum H_i \cdot L_i. \quad (16)$$

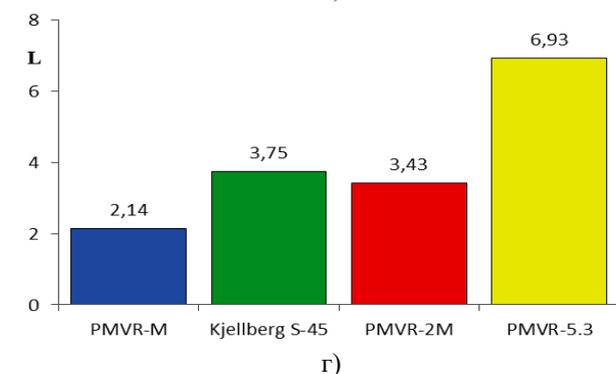
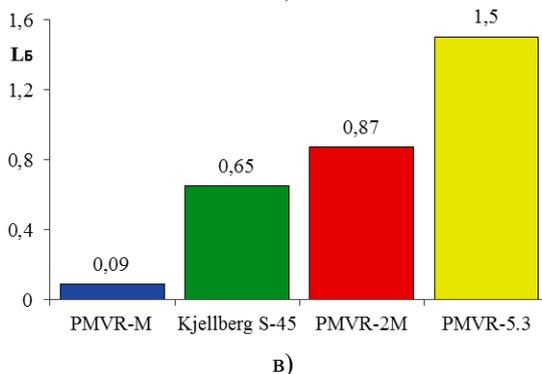
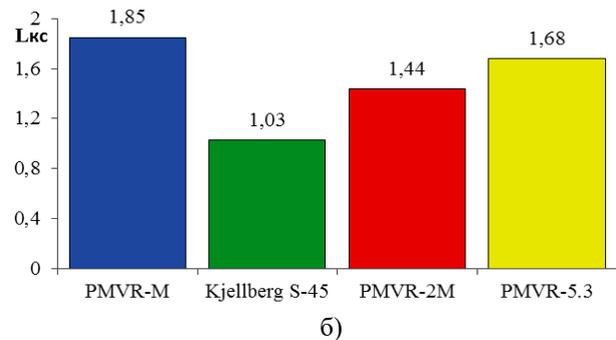
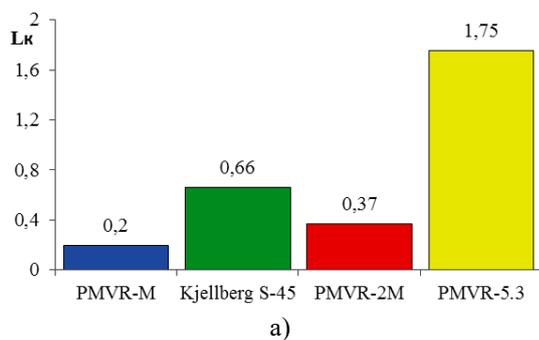


Рисунок 24 – Интегральные коэффициенты квалиметрической оценки эффективности проектирования плазматронов: а) эффективности и качества реза  $L_K$ , б) качества сварных швов  $L_{KC}$ , в) безопасности  $L_B$ , г) суммарной эффективности резки  $L = L_K + L_{KC} + L_B$

Представленные на рис.24 результаты квалитетического анализа свидетельствуют об эффективности работы новых плазмотронов. Плазмотрон ПМВР-2М по сравнению с базовым аналогом – плазмотроном ПМВР-М – показал фактически двукратное улучшение, как по величине интегрального коэффициента эффективности, так и по качеству резки, безопасности и энергоэффективности. При этом суммарные показатели его эффективности оказались сопоставимы с показателями одной из самых популярных импортных моделей однопоточных плазмотронов – Kjellberg PB S-45, что свидетельствует о тех преимуществах, которые дает использование в его конструкции новой системы газовыхревой стабилизации. Ещё более эффективным (фактически в 2 раза по сравнению с ПМВР-2М и Kjellberg PB S-45) показал себя новый плазмотрон ПМВР-5.3, работающий по технологии узкоструйной плазмы с двухпоточной схемой газовой стабилизации. Особенно велики его преимущества по производительности, энергоэффективности, качеству реза и безопасности. Следует заметить, что показатели качества сварных швов, полученных после плазменной резки, оказались сопоставимыми для разных плазмотронов, что, очевидно, связано с меньшей зависимостью параметров сварного соединения от качества подготовленных под сварку разделочных швов, полученных резкой современными плазмотронами.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По итогам выполнения диссертационной работы можно сформулировать следующие выводы, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Установлен комплекс параметров, определяющих эффективность проектирования по критериям функциональности, качества и безопасности.

2. Сформулированы методы и принципы газодинамического проектирования плазмотронов.

3. Разработаны методики оценки газодинамических параметров, которые позволяют выявить конструктивные недостатки в ГВТ плазмотронов и повысить эффективность течения ПОГ при их проектировании.

4. Разработаны, изготовлены и испытаны конструкции одно- и двухпоточных плазмотронов, обеспечивающих высокие показатели качества и производительности реза, в сочетании с экономичностью и безопасностью.

5. Предложен комплекс методов экспериментальных исследований для определения параметров акустического излучения плазмотронов. Объяснены механизмы генерации акустического и оптического излучения плазмотронами.

6. Предложены методы проектирования плазмотронов, направленные на снижение общего уровня шума. Внедрение плазмотронов с двухпоточным способом подачи газа способно снизить уровень оптического и акустического излучений.

7. Показана возможность подготовки заготовок под сварку без предварительного механического удаления слоя металла кромки реза за счет применения ряда модернизированных отечественных плазмотронов (включая созданные в рамках данной работы).

8. Предложен метод квалитетического анализа для оценки эффективности проектирования.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в следующем:

- формулировка основных принципов, методов проектирования и применения электродуговых плазмотронов для родственных технологий – термообработки, напыления, сварки, экотехнологий и т.д.;
- применение разработанных методик при конструировании плазмотронов широкого класса функционального и технологического применения;
- разработка и совершенствование конструкций плазмотронов для резки металлов и технологий их применения по показателям эффективности, качества и безопасности;
- расширение технологических возможностей плазмотронов, работающих по двухпоточной узкоструйной технологии;
- внедрение принципов, методов и результатов проектирования по критериям безопасности в нормативные документы, регламентирующие разработку и применение плазменных и родственных технологий;
- комплексное обоснование критериев применимости плазменной резки в технологии производства сварных соединений без дополнительной механической обработки поверхности реза с последующей корректировкой соответствующих технологических регламентов и стандартов.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:**

1. Анахов С.В. Температурные корреляции параметров газовой стабилизации металлорежущих плазмотронов / С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. «Машиностроение, материаловедение», 2018. – Том 20, №3. – С.29-37; 0,6 п.л./0,2 п.л.

2. Анахов С.В. Методики расчета и проектирования плазмотронов для резки металлов // С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин // Сварочное производство, 2018. – №7. – С.19-24; 0,4 п.л./0,1 п.л. (Scopus)

3. Анахов С.В. Оценка эффективности газовой стабилизации в плазмотронах для резки металлов / М.П. Шалимов, С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, И.Ю. Матушкина // Сварка и Диагностика, 2018. – № 2. – С. 57-61; 0,3 п.л./0,1 п.л.

4. Анахов С.В. Методические основы автоматизированного газодинамического проектирования в электроплазменных технологиях / С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. «Машиностроение, материаловедение», 2018. – Том 20, №1. – С.62-70; 0,6 п.л./0,2 п.л.

5. Анахов С.В. Квалиметрическая оценка эффективности проектирования плазмотронов для резки металлов / С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. «Машиностроение, материаловедение», 2017. – Том 19, №2. – С.160-178; 1,2 п.л./0,4 п.л.

6. Анахов С.В. Исследование качества резки стали с применением узкоструйной плазменной технологии/ С.В. Анахов, Н.Б. Пугачева, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, Быкова Т.М. // Физика и химия обработки материалов, 2016. – №4. – С.31-37; 0,4 п.л./0,1 п.л.

7. Анахов С.В. Механические и технологические свойства сварных соединений, полученных с применением плазменной резки/ С.В. Анахов, С.В. Гладковский, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, С.В. Лепихин, Д.А. Двойников // Сварочное производство, 2016. - №6. – С.8-13; 0,6 п.л./0,2 п.л. (Scopus)

8. Анахов С.В. Микроструктурный анализ сварных соединений, полученных с применением плазменных технологий резки/ С.В. Анахов, Н.Б. Пугачева, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, Т.М. Быкова // Физика и химия обработки материалов, 2016. – №2. – С. 17-22; 0,4 п.л./0,1 п.л.

9. Анахов С.В. Анализ прочности и пластичности сварных соединений, полученных с применением металлорежущих плазменных технологий/ С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, Д.А. Голотвин, А.В. Матушкин // Сварка и Диагностика. – 2016. – №1. – С.56-59; 0,3 п.л./0,1 п.л.

10. Анахов С.В. Анализ акустической безопасности узкоструйных металлорежущих плазматронов / С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин // Сварочное производство. – 2016. – №1. – С.5-9; 0,3 п.л./0,1 п.л. (Scopus)

11. Анахов С.В. Газовихревая стабилизация в плазматронах: новые решения / С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин // Сварочное производство. – 2015. – №5. – С.49-53; 0,3 п.л./0,1 п.л. (Scopus)

12. Анахов С.В. Исследование систем газовихревой стабилизации плазматронов / С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин // Сварочное производство. – 2015. – №4. – С.20-24; 0,3 п.л./0,1 п.л. (Scopus)

13. Анахов С.В. Принципы и методы проектирования дуговых режущих плазматронов постоянного тока/ С.В. Анахов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т.15, №1. – С.61-64; 0,3 п.л./0,1 п.л.

14. Анахов С.В. Новый плазматрон для резки металла под сварку: сравнительный анализ / С.В. Анахов, А.В. Матушкин, Ю.А. Пыкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т.15, №1. – С.65-69; 0,3 п.л./0,1 п.л.

15. Анахов С.В. Электроплазменные технологии: проектирование с учетом факторов безопасности / С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин // Безопасность жизнедеятельности. – 2014. – №10. – С.14-21; 0,5 п.л./0,2 п.л.

16. Анахов С.В. Системные принципы в решении задач экологической безопасности с применением плазменных технологий/ С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, С.А. Шакуров // Экология и промышленность России. – 2014. – №1. – С.4-9; 0,4 п.л./0,1 п.л.

17. Анахов С.В. Об эффективности применения плазменных технологий в разделке трубного проката / Ю.А. Пыкин, С.В. Анахов, И.Ю. Пышминцев, Д.В. Овчинников, В.А. Елькин // Производство проката. – 2014. – №1. – С.38-45; 0,5 п.л./0,2 п.л.

18. Анахов С.В. Структурно-функциональные принципы проектирования в электроплазменных технологиях/ С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, С.А. Шакуров // Сварочное производство. – 2013. – №7. – С.39-43; 0,3 п.л./0,1 п.л. (Scopus)

19. Анахов С.В. Обобщенные методы проектирования в электроплазменных технологиях/ С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, С.А. Шакуров // Сварочное производство. – 2013. – №6. – С.38-43; 0,4 п.л./0,1 п.л. (Scopus)
20. Анахов С.В. Методика акустического проектирования соплового узла плазматронов/ С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин // Технология машиностроения. – 2012. – №10. – С.27-32; 0,4 п.л./0,1 п.л.
21. Анахов С.В. Особенности акустического проектирования соплового узла плазматрона по катодному профилю / С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин // Технология машиностроения. – 2012. – №6. – С.38-43; 0,4 п.л./0,1 п.л.
22. Анахов С.В. Принципы безопасного проектирования газоздушных трактов плазматронов/ С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, С.А. Шакуров // Сварочное производство. – 2012. – №3. – С.39-43; 0,3 п.л./0,1 п.л. (Scopus)
23. Анахов С.В. Плазменные электротехнологии: диагностика по критериям акустической безопасности/ А.В. Матушкин, И.Ю. Матушкина, С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин // Сварка и диагностика. – 2012. – №1. – С.40-45; 0,4 п.л./0,1 п.л.
24. Анахов С.В. Газодинамические особенности проектирования плазматронов / С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, С.А. Шакуров // Сварочное производство. – 2011. – №12. – С.10-15; 0,4 п.л./0,1 п.л. (Scopus)
25. Анахов С.В. Особенности теплофизического проектирования плазматронов для резки металлов/ С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин, С.А. Шакуров // Сварочное производство. – 2011. – №11. – С.25-30; 0,4 п.л./0,1 п.л. (Scopus)
26. Анахов С.В. Влияние активных газовых компонент на эффект плазменного поверхностного упрочнения/ С.В. Анахов // Сварочное производство. – 2011. – №9. – С.26-33; 0,5 п.л./0,5 п.л. (Scopus)
27. Анахов С.В. Особенности профилирования газоздушных трактов малошумных плазматронов/ С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин, А.В. Матушкин // Сварочное производство. – 2011. – №6. – С. 40-44; 0,3 п.л./0,1 п.л. (Scopus)
28. Анахов С.В. Плазматрон как резонансный акустический излучатель/ С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин // Физическое образование в вузах. – 2011. – №3. – С.66-77; 0,8 п.л./0,2 п.л.
29. Анахов С.В. Интегративные элементы физической модели «Плазматрон»/ С.В. Анахов // Физическое образование в вузах. – 2011. – №2. – С.69-75; 0,4 п.л./0,4 п.л.
30. Анахов С.В. Плазменные технологии для экологизации производств/ С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин // Безопасность в техносфере. – 2011. – №5. – С.45-53; 0,6 п.л./0,2 п.л.
31. Анахов С.В. Факторы снижения шумов при работе плазменного оборудования / Ю.А. Пыкин, С.В. Анахов // Технология машиностроения. – 2008. – №7. – С.64-67; 0,3 п.л./0,1 п.л.
32. Анахов С.В. Исследование поверхности реза при термической разделительной резке стали 09Г2С/ С.В. Анахов, К. Сингер, Ю.А. Пыкин, С.А. Шакуров, А.В. Матушкин // Сварочное производство. – 2007. – №7. – С.18-21; 0,3 п.л./0,1 п.л. (Scopus)
33. Анахов С.В. Сравнительный анализ газодинамических факторов шумоизлучения плазматронов/ С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин // Сварочное производство. – 2005. – №1. – С.31-36; 0,4 п.л./0,1 п.л. (Scopus)

34. Анахов С.В. Шумообразующие факторы в технологиях высокоэнергетического воздействия на материалы/ Ю.А. Пыкин, С.В. Анахов, О.И. Стеклов // Сварочное производство. – 2004. – №10. – С. 47-50; 0,2 п.л./0,1 п.л. (Scopus)

35. Анахов С.В. Эффективность и безопасность технологий плазменно-дуговой резки металлов/ Ю.А. Пыкин, С.В. Анахов, А.В. Наумейко //Безопасность труда в промышленности. – 2003. – №9. – С.15-17; 0,2 п.л./0,1 п.л.

#### **Монографии:**

36. Анахов С.В. Принципы и методы проектирования плазмотронов. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2018. – 165 с; 5,2 п.л./5,2 п.л.

37. Анахов С.В., Пыкин Ю.А. Плазмотроны: проблема акустической безопасности. Теплофизические и газодинамические принципы проектирования малозумных плазмотронов. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. – 224 с; 7,0 п.л./4,0 п.л.

38. Анахов С.В., Пыкин Ю.А. Экологическое проектирование: стратегии и технологии. – Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing, AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG, 2012. – 125 с; 3,9 п.л./2,0 п.л.

#### **Патенты и свидетельства о госрегистрации программ:**

39. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Чернокутов М.Ю. Программа расчета спектра излучения плазмотрона в звуковом диапазоне частот. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2018661226 от 04.09.2018.

40. Пыкин Ю.А., Анахов С.В., Матушкин А.В. Патент на изобретение «Плазмотрон» №2584367 от 11.03.2015.

41. Пыкин Ю.А., Анахов С.В., Шакуров С.А., Тетюков А.Г. Патент на полезную модель «Плазмотрон» №67909 от 22.05.2007.

#### **Другие публикации:**

42. Anakhov S.V. Principles of integrative modelling at studying of plasma and welding processes / S.V. Anakhov, E.A. Perminov, D.K. Dzyubich, M.A. Yarushina, Y.A. Tarasova // International Journal of Environmental & Science Education. 2016, Volume 11, Issue 15, p. 8303-8310; 0,5 п.л./0,2 п.л.

43. Anakhov S.V. Narrow Jet Plasma as the Energy Efficient and Safe Technology for Metal Cutting/ S.V. Anakhov, Yu.A. Pykin, A.V. Matushkin // Solid State Phenomena (Material Science Forum). 2016, Volume 870, p. 523-527; 0,3 п.л./0,1 п.л.

44. Anakhov S.V. Gases and RRR distribution in high purity niobium EB welded in Ultra-High Vacuum / S.V. Anakhov, X. Singer, W. Singer, H. Wen // Proceedings ISOHIM-2005, AIP, 2006, V.837, New-York, p.71-85; 0,9 п.л./0,3 п.л.

Подписано в печать 11.03.2019 г. Формат 60×84 1/16  
Бумага 80 г/м<sup>2</sup>. Цифровая печать.  
Тираж 100 экз. Заказ № 1.

Отпечатано в учебной лаборатории полиграфических машин кафедры  
«Металлургические и роторные машины» ИНМиТ УрФУ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-120