

Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО «Российский государственный
профессионально-педагогический университет»

С. В. Анахов

**ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ
ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Учебное пособие

Екатеринбург
2009

ББК 30н
УДК 534
ГРНТИ 29.37, 87.55, 86.33

Анахов С. В. Основы безопасности электроплазменных процессов
[Текст]: учеб. пособие / С. В. Анахов. ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т». Екатеринбург, 2009. 48 с.

Рассмотрены физико-технические причины образования неблагоприятных факторов электроплазменных процессов с точки зрения обеспечения принципов производственной безопасности. Плазменные технологии представлены также в качестве фактора обеспечения экологической безопасности окружающей среды.

Пособие предназначено для студентов – будущих педагогов профессионального обучения специализаций электроэнергетического и машиностроительного направлений.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Ю. А. Пыкин (ГОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет»); канд. техн. наук, доц. А. А. Карпов (ГОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет»)

© ГОУ ВПО «Российский государственный
профессионально-педагогический
университет», 2009

© Анахов С. В., 2009

Введение

Изучение физических основ современных промышленных технологий является одной из основных задач преподавания курсов физики студентам инженерных специальностей. При этом детальное рассмотрение любого технологического процесса неизбежно затрагивает целый комплекс вопросов общезначимого характера, предоставляя возможность педагогам и студентам в процессе обучения опираться как на частные, так и интегральные физические модели. В ряду таких моделей следует обратить внимание на генератор низкотемпературной плазмы – плазмотрон, применяемый для резки, сварки, напыления и термпереработки материалов (утилизация отходов, плазмохимические технологии) при температурах от 7 до 30 тыс. К. Широкое внедрение этих технологий, обеспечивающее высокую производительность и качество процесса, зачастую вступает в противоречие с требованиями норм по защите персонала от воздействия опасных и вредных производственных факторов, соблюдения санитарной и экологической безопасности в рабочей зоне. Поиск оптимальных условий применения плазменных технологий невозможен без понимания физики протекающих при этом процессов и их взаимосвязи с негативными факторами таких производств.

Как известно, процесс плазменной резки сопровождается повышенным уровнем выделения сварочных аэрозолей, газов (озона, азота), углерода, хрома, марганца, никеля [1]. Вредными факторами являются также высокое акустическое загрязнение, интенсивное световое и тепловое излучение, электромагнитное воздействие [2]. Исходя из объективных показателей, обслуживающий персонал работает в экстремальных условиях, а профессию оператора (плазморезчика) можно отнести к особо опасной. Практически не работающие Основы законодательства "Об охране труда в Российской Федерации", отсутствие современных национальных стандартов по безопасности труда в сварочном

производстве при использовании электроплазменных процессов, низкая техническая культура работников и малоэффективные нестандартизованные средства защиты - таковы составляющие общей проблемы охраны труда.

1. Электроплазменные технологии

Основным отличием электроплазменных технологий от других методов воздействия на материалы является использование *генератора плазмы*–устройства, создающего из нейтральных веществ потоки низкотемпературной плазмы, т.е. плазму с кинетической энергией частиц, практически равной их энергии ионизации [3]. Генераторы плазмы, работающие на газах при давлениях сравнимых с атмосферным, называют *плазмотронами*. Аппарат был изобретен в начале XX века наряду с первыми открытиями в физике плазмы и технологии её генерации. Тем не менее, активное внедрение плазменных процессов в промышленность началось только во 2-ой половине XX века после решения материаловедческих проблем эрозии электродов при большой плотности тока плазменной дуги ($j \sim 10^5 \text{ A/cm}^2$) за счет использования тугоплавких (как правило, вольфрамовых и гафниевых) катодных вставок и газодинамической стабилизации дуги в межэлектродном пространстве. Мощность современных плазмотронов составляет от единиц до тысяч кВт [4]. Сегодня плазмотронная техника и технология являются большой отраслью. Она охватывает плазменную резку металлов (рис. 1), плавку, наплавку, напыление покрытий, плазмохимию, спецметаллургию, решение экологических проблем, получение новых чистых материалов, ультрадисперсных и специальных порошков, нанесение пленок и покрытий вакуумно-плазменным методом и т.д. [5]. К настоящему дню разработано большое количество электродуговых плазмотронов для самых разных целей. Они применяются для нагревания газа в аэродинамических трубах и плазмохимических реакторах, при прямом

восстановлении металлов из руд, интенсификации доменных и мартеновских процессов. Плазмотроны используются как инструмент для термического бурения горных пород, при спектроскопических исследованиях, для получения стабильного эталона излучения, в качестве реактивных двигателей малой тяги для космических аппаратов и т.д.

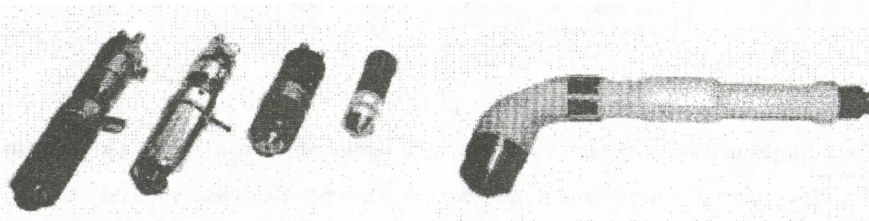


Рис.1. Механизированные (ПМВР) и ручные (ПВР) плазмотроны для резки металлов

В широком ряду электродуговых плазменных технологий имеются общие черты, позволяющие описать их, в целом, не рассматривая подробно сложную технологическую цепь, обеспечивающую функционирование конкретного процесса. Для этого применим структурно-функциональный метод, в основе которого лежит представление технологической структуры как иерархической последовательности взаимосвязанных информационных устройств [6]. Разделение материи на объекты воздействия (массу, энергию и информацию) и средства воздействия – материально-энергетические комплексы – позволяет выделить процессы, обеспечивающие движение материи между средствами воздействия. Применительно к технологиям плазменной обработки материалов данная схема приобретает вид, представленный на рис.2.

В качестве *объектов воздействия* в любой низкотемпературной плазменной технологии выступают электроэнергия и вещество, поступающее в плазмотрон в различных фазовых состояниях (плазмообразующий газ, охлаждающая вода, порошки, парогазовые смеси) и с разной, но ненулевой энергией (под давлением). Объектом внешнего воздействия являются также и твердые материалы – в технологиях плазменной резки, сварки, наплавки.

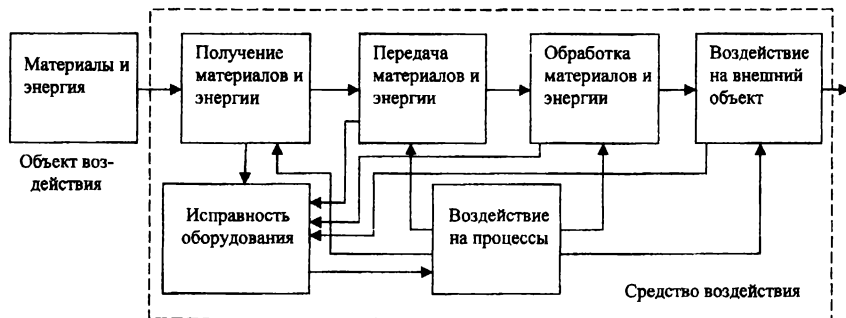


Рис.2.Материально-энергетическая структура технологического объекта «плазматрон»

Получение и передача материалов и энергии происходит по технологическим каналам от соответствующих систем, включенных в общую функциональную схему, в плазматрон. Описание соответствующих процессов строится на базе законов аэро- и гидродинамики, теории электрических цепей постоянного и переменного тока.

В плазматроне осуществляются процессы **обработки и взаимного превращения материалов и энергии**. Газовоздушный тракт (ГВТ) плазматрона проектируется с учетом минимизации аэрогидродинамических потерь плазмообразующего газа, а также обеспечения условий стабилизации горения дуги в межэлектродном пространстве. Кинетическая энергия газового потока при его прохождении через завихритель частично преобразуется в энергию упорядоченного вращательного движения, стабилизирующего дугу, и частично – в энергию турбулентных пульсаций потока. В межэлектродном пространстве происходит возбуждение газового разряда с последующей передачей электрической энергии в дугу низкотемпературной плазмы. С точки зрения экологии и безопасности плазменных процессов следует обратить внимание не только на соблюдение условий энергетического баланса, но и на переход определенной части энергии в энергию акустических колебаний и радиационного излучения, вызывающий негативный эффект воздействия на рабочий персонал. Особое внимание надо уделить происходящим на этой стадии фазовым превращениям:

плазмообразующего газа – в низкотемпературную плазму, а при подаче в плазменную дугу вещества – на физико-химические трансформации, происходящие в условиях высокотемпературного на них воздействия. Описание появившегося на этой стадии плазменного состояния вещества дает широкое поле для рассмотрения его свойств на примере плазменной дуги (струи) как на качественном уровне, так и на примерах конкретных расчетов (степени ионизации, температур, скоростей, компонентного состава и т.д.).

Влияние на внешний объект осуществляется в большинстве плазменных технологий за счет высокоэнергетичного термокинетического воздействия на обрабатываемый материал. Экологический аспект требует помимо рассмотрения условий, обеспечивающих соответствующий эффект воздействия, обратить внимание на негативные факторы, возникающие при работе плазмотрона – высокий уровень шума (до 120-130 дБ), радиационное излучение и присутствие вредных аэрозолей и газовых компонент (при работе с легированными сталями и токсичными газовыми смесями).

Устойчивая работа всей технологической схемы невозможна без соответствующего **воздействия на её отдельные элементы**, обеспечивающего контроль и оптимизацию технологических и физических параметров процессов, а также **исправность используемого оборудования**. Такое воздействие должно осуществляться как в процессе работы (ручное или автоматическое), так и на стадии предварительного теоретического анализа и проектирования технологии.

Среди всего комплекса плазменных технологий особого внимания заслуживает разделительная резка металлов. Это обусловлено потребностями оборонных, топливно-энергетических, машиностроительных, металлургических, транспортных и других отраслей, то есть тех производств, где необходим массовый раскрой металлопроката, разделка металлолома, военной техники и объектов гражданского и специального назначения. Плазменная резка, являю-

ящая высокоэффективной и малоотходной технологией, играет в этом деле незаменимую роль, так как её можно применять при обработке всех классов токопроводящих материалов – легированных сталей, черных и цветных металлов и их сплавов. Плазменные технологии позволяют вести разделку металлов толщиной от 0,5 до 120 мм при сравнительно низких затратах на энергопотребление и расход газовых носителей. В экологическом плане применение таких технологий обусловлено потребностью в утилизации большого количества брошенной техники и оборудования в полевых условиях (разделки в транспортный габарит для последующего вывоза и переплавки). Применение плазменных технологий при этом дает ряд неоспоримых преимуществ. Во-первых, за счет свойств высокотемпературной плазмы значительно возрастает производительность процесса (рис.3).

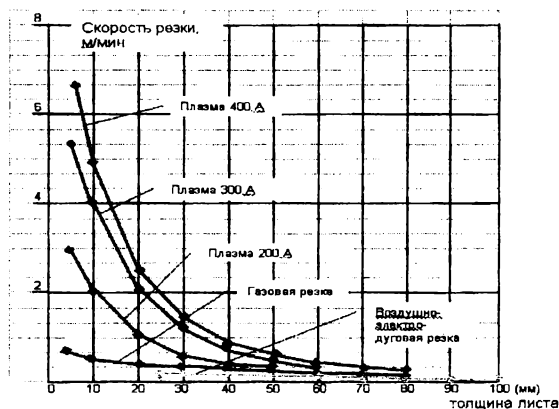


Рис. 3. Сравнение технологий термической резки металлов по скорости

Как свидетельствует опыт, несмотря на относительно высокое энергопотребление (15-25 кВт на плазматрон), в 2-3 раза более высокая скорость плазменной резки обеспечивает большую эффективность разделки, по сравнению с другими методами – газовыми, механическими и т.д. Во-вторых, в качестве плазмообразующего газа может служить только воздух вместо

использования дорогостоящих газов. Процесс утилизации при таком способе разделки металлолома становится доступным и дешевым (рис. 4).

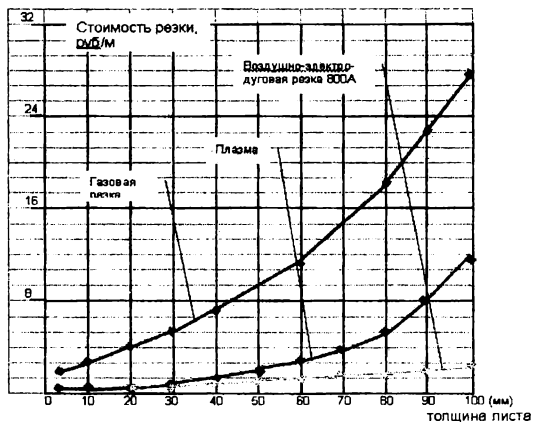


Рис. 4. Сравнение технологий термической резки металлов по затратам энергоносителей на метр реза

На примере участка по разделке трубы диам.1420 мм с толщиной стенки 18.7 мм на сутунки 308x1010 мм для последующей прокатки в лист видно, что при использовании автоматической плазменной резки достигается наилучший результат по сравнению с традиционными методами (табл. 1). Так, орбитальная резка такой трубы будет занимать около 5 минут.

Таблица 1

Сравнительные характеристики способов резки

Технология резки трубы	Удельная производительность, тн/чел-мес.	Удельные энергозатраты, руб/тн
Ручная газовая	75	86,7
Ручная плазменная	120	18,5
Механизированная плазменная	140	18,5
Полуавтоматическая	195	18,5

2. Опасные и вредные факторы

Плазменные технологии в процессе своего применения становятся источником негативного воздействия на окружающую среду и обслуживающий персонал (рис.5). Процесс плазменной резки сопровождается повышенным, по сравнению с ПДК (в 3 – 25 раз), уровнем выделения сварочных аэрозолей, газов (озона, азота), углерода, хрома, марганца, никеля. Негативными факторами являются также сильное акустическое воздействие с превышением нормируемых значений на 5-20 дБА, интенсивное электромагнитное, световое и тепловое излучение (до 100 ПДУ в ультрафиолетовом и до 7 ПДУ в инфракрасном диапазоне). Объективные показатели свидетельствуют о повышенной опасности, которой подвергается обслуживающий персонал (плазморезчик), работая в экстремальных условиях.

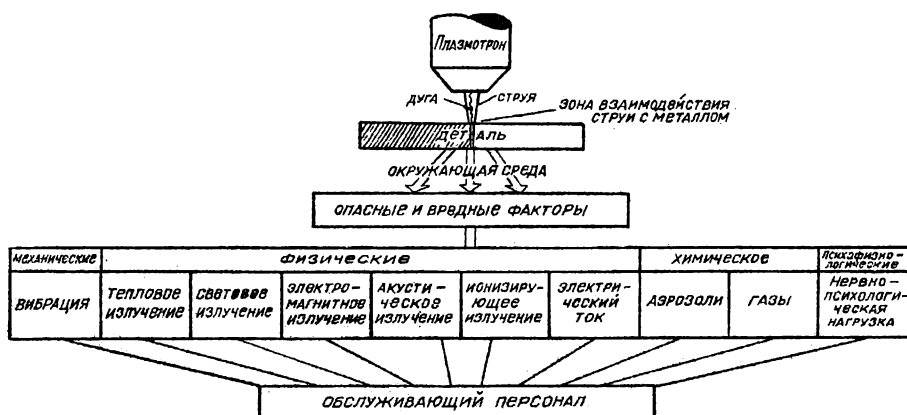


Рис.5. Опасные и вредные факторы воздействия на окружающую среду и обслуживающий персонал в электроплазменных процессах

Представленные в табл.2 данные свидетельствуют о наличии практически всего набора вредных и опасных производственных факторов в технологиях плазменной обработки материалов. Очевидно, что комплекс неблагоприятных факторов, сопровождающих плазменнодуговые процессы, во многом схож с

комплексом, сопутствующим сварочным и лазерным технологиям, по причине общности используемого принципа высокоэнергетичного концентрированного воздействия на материалы [7]. Однако, характерной особенностью большинства плазменных процессов, как следует из таблицы, является интенсивное шумовыделение. По этой причине уделим фактору акустического загрязнения рабочей зоны повышенное внимание.

Таблица 2

Опасные и вредные факторы в технологиях высокоэнергетического воздействия на материалы (по данным [1])

Технология	Вредные производственные факторы										Опасные факторы			
	Вредные вещества	Излучение в оптическом диапазоне			Электромагнитные поля	Магнитные поля	Ионизирующее излучение	Шум	Ультразвук	Статические нагрузки	Электрический ток	Искры, брызги и выбросы расплавленного металла	Движущиеся механизмы и изделия	Повышенное к атмосферному давлению
		Ультрафиолетовое	Видимое	Инфракрасное										
Плазменная резка	хх	х	хх	хх	-	-	х	хх	хх	хх	хх	х	хх	
Плазмохимия	хх	х	хх	хх	хх	хх	х	хх	хх	-	хх	-	хх	
Сварка:														
-плазменная	хх	х	хх	хх	-	-	х	хх	хх	-	хх	х	хх	
-ультразвуковая	х	-	-	-	-	-	-	хх	хх	-	х	-	х	
-ручная дуговая	хх	хх	хх	хх	-	-	-	х	-	х	хх	хх	х	
-электрошлаковая	хх	х	х	хх	-	-	-	х	-	-	хх	хх	хх	
-контактная	хх	-	-	х	х	х	-	х	-	х	хх	х	хх	
-электронно-лучевая	х	хх	хх	-	-	-	хх	х	-	-	хх	-	х	
-диффузионная	-	-	-	-	хх	-	-	х	хх	-	хх	-	хх	
-высокочастотная	-	-	-	-	хх	-	-	-	-	-	хх	-	х	
-газовая	х	хх	хх	хх	-	-	-	х	-	х	х	хх	х	
-лазерная (+резка)	х	х	х	хх	-	-	-	х	-	-	хх	-	х	
Кислородная резка	хх	х	хх	хх	-	-	-	хх	х	х	х	хх	х	
Пайка	хх	-	-	-	-	-	-	-	-	-	хх	-	-	
Наплавка	хх	х	хх	хх	-	-	-	-	-	х	хх	х	х	
Напыление	хх	хх	х	х	-	-	-	хх	хх	-	хх	хх	х	

Примечание: хх – интенсивный фактор, х – умеренный фактор, (-) – незначительный фактор или его отсутствие.

2.1. Шумовой фактор

Шумовое загрязнение, сопровождающее рассматриваемые технологии (рис.6 и 7), как уже было отмечено, - одно из наиболее существенных в широком ряду вредных факторов производства [8]. Спектрограммы шума, создаваемого различными источниками в пределах рабочей зоны, свидетельствуют, что основным источником шума является плазмотрон (рис.8). Известно, что в странах с высокоразвитым производством в целях снижения шума не используются ручные плазмтроны при рабочих токах свыше 150 А, а автоматическая плазменная обработка на более высоких токах разрешена только при нахождении оператора за защитным экраном вне рабочей зоны. Однако, широкая практика использования ручной плазменной резки в России и недостаточный уровень защиты персонала в условиях её автоматизированного применения ставят задачу снижения шума непосредственно в источнике его генерации – плазмотроне.

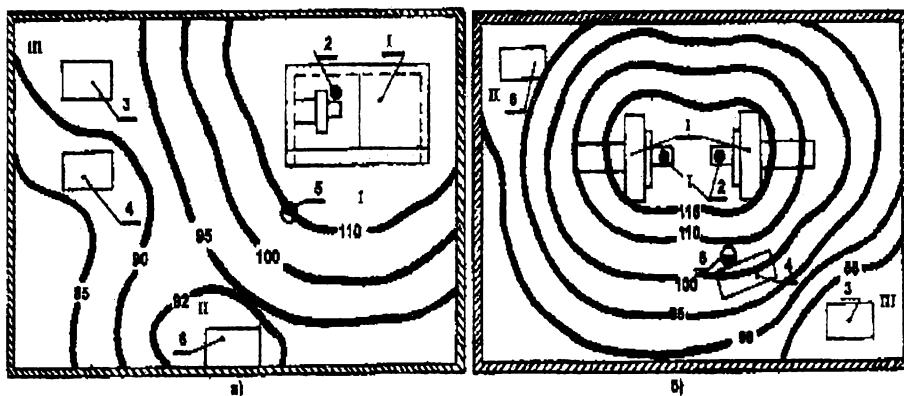


Рис. 6. Шумовая карта рабочей зоны: а – плазменное напыление, б - плазменно-механическая обработка, I-III – зоны повышенной шумовой опасности, 1 – машина для плазменной обработки, 2 – плазмотрон, 3 – источник питания, 4 – пульт управления, 5 – рабочее место, 6 – система вентиляции

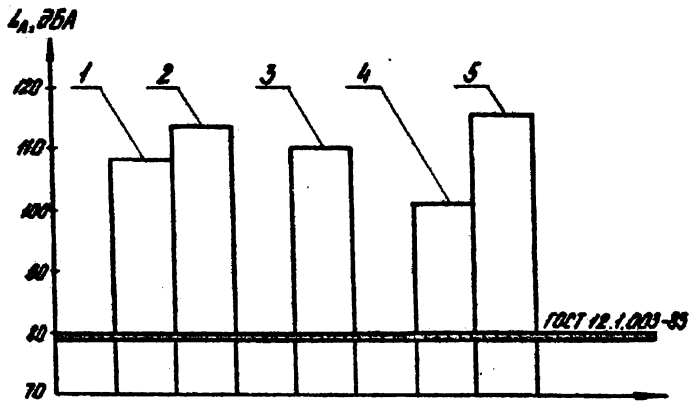


Рис.7. Акустическая характеристика (уровень звука) процессов плазменной обработки: 1 – плазменная резка, 2 – плазменно-механическая обработка, 3 – плазменное напыление, 4 – плазматрон в камере, 5 – плазматрон без камеры

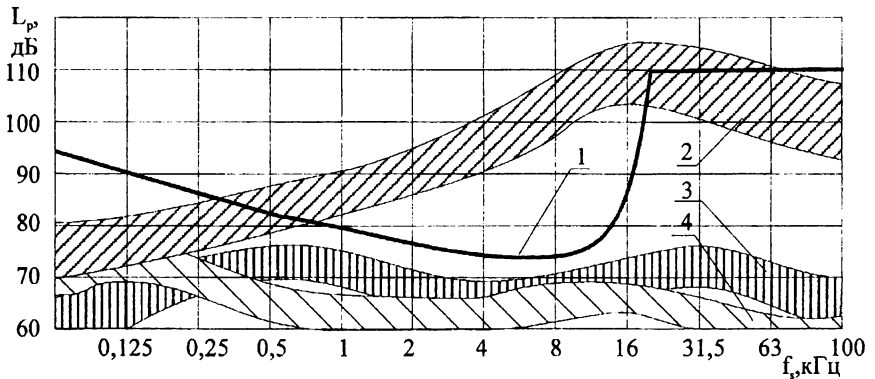


Рис.8. Уровень звуковой мощности основных источников шумообразования на рабочем участке: 1 – нормируемая кривая; 2 – зона плазменной обработки; 3 – источник питания; 4 – механизм перемещения

Непосредственно в зоне плазменной обработки шум образуется на нескольких участках: непосредственно внутри плазматрона (70-72% общей звуковой мощности рабочей зоны), турбулентным газодинамическим потоком плазменной струи, в щели разрезаемого металла в процессах резки, в области за разрезаемым металлом (рис.9).

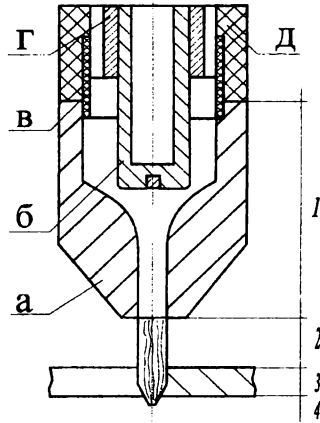


Рис. 9. Основные источники генерации шума в системе "плазмотрон - материал": а - сопло, б - катод, в - уплотнительная втулка, г - электрододержатель, д - корпус; 1-4 - зоны шумообразования

Анализ представленных на рис.10 характерных спектрограмм, измеренных в лабораторных условиях уровней звукового давления L_m при «горячем» и «холодном» (без плазмообразования) истечении газа позволяет выделить основные особенности шумоизлучения, создаваемого при работе плазмотронами типа ПВР – 402, серийно выпускаемых для резки металлов [9].

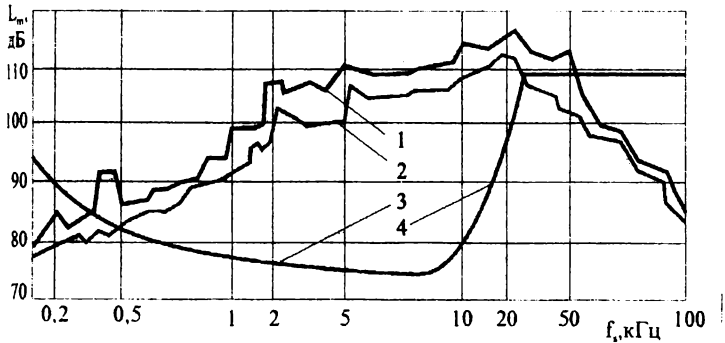


Рис.10. Спектральные уровни звукового давления плазмотрона (1 – на «горячей» струе, 2 – на «холодной» струе, 3,4 – нормирующие кривые по ГОСТ 12.1.003-83 и 12.1.003-89)

1. Высокий общий уровень звукового давления, достигающий $115 \div 125$ дБ на «горячей» струе и $105 \div 115$ дБ на «холодной», что существенно выше допустимых значений.

2. Превышение шума «горячей» струи на $5 \div 12$ дБ над шумом модельной «холодной» струи практически во всём диапазоне исследуемых частот, что объясняется ростом средней скорости истечения струи из сопла плазмотрона.

3. Шум плазмотрона в области инфразвуковых и низких звуковых частот (до 400 Гц) не превосходит нормируемых значений; в области средних звуковых частот (до 1 кГц) превышение составляет $4 \div 7$ дБ; в области высоких частот наблюдается рост звукового давления, максимальное превышение при этом достигает $30 \div 35$ дБ на низких частотах ультразвукового диапазона ($8 \div 16$ кГц).

4. В нормируемом диапазоне слышимых (до 16 кГц) и низких ультразвуковых частот (до 31,5 кГц) уровень звуковой мощности во многом определяется дискретными тонами, которые возникают уже при малых давлениях плазмообразующего газа и маскируются турбулентным шумом струи при увеличении давления. Как правило, можно наблюдать 1 ÷ 2 тона дискретной частоты, количество, амплитуда и частота которых изменяется при варьировании геометрических параметров соплового узла плазмотрона и условий течения ПОГ по газоздушному тракту (ГВТ). Вышесказанное позволяет предположить, что причиной возникновения шума с дискретным частотным спектром служит неустойчивое течение плазмообразующего газа при наличии механизма регулирования частоты колебаний в виде резонатора, которым в данных условиях является газоздушный тракт плазмотрона.

5. Шумоизлучение плазмотрона носит направленный характер с максимумом излучения в направлении $40\text{-}50^{\circ}$ от оси, соответствующей направлению плазменной струи, со слабо выраженной частотной зависимостью (рис.11).

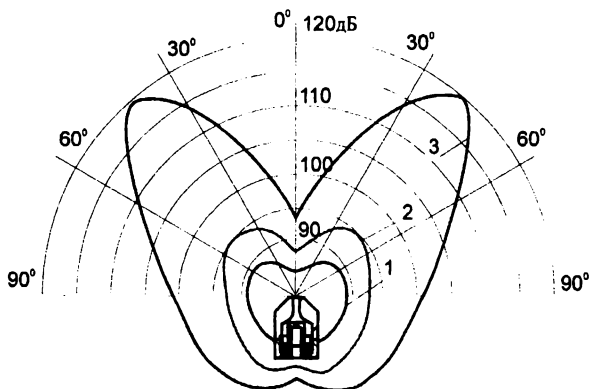


Рис.11. Диаграмма направленности звукового поля плазматрона:

1 – 3 кГц; 2 – 8 кГц; 3 – 80 кГц

Появление дискретных составляющих в ультразвуковой части спектра шумоизлучения может быть объяснено, если рассмотреть механизм возбуждения дискретных тонов в волноводе – цилиндрической части сопла плазматрона при течении газа с последующим излучением в среду с меньшим давлением. Свою роль при сверхзвуковом режиме истечения плазменной струи может сыграть также механизм генерации, возникающий из-за наличия ударных волн (скачков уплотнения). Таким образом, газоздушный тракт плазматрона является одним из основных источников генерации аэродинамического шума и может рассматриваться как резонансная система, вызывающая появление пиков мощности в спектре до 10 кГц. При этом сопловой узел представляет собой открытый резонансный излучатель, ответственный за появление пиков в ультразвуковой части спектра.

Механизм генерации шума непосредственно в плазматроне можно рассмотреть на основе физической модели резонансного возбуждения пульсаций газового потока при его прохождении по газоздушному тракту устройства. В качестве анализируемой модели был выбран серийный плазматрон для резки типа ПВР-402. Газоздушный тракт такого плазматрона представляет собой канал изменяющейся формы с резкими перепадами площади поперечного

сечения. Характерные изменения гидравлических параметров по газовоздушному тракту плазмотрона представлены на рис. 12.

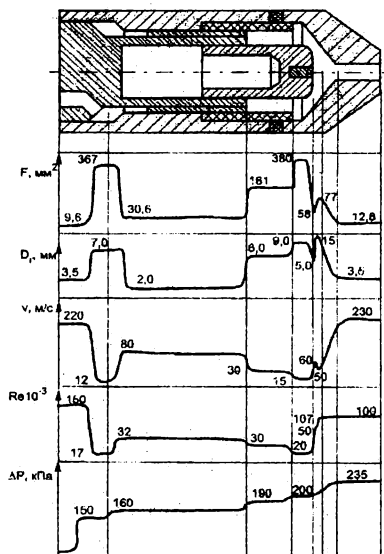


Рис. 12. Изменение гидродинамических параметров по тракту плазмотрона ПВР-402 (F – площадь проходного сечения ГВТ, D_г – гидравлический диаметр, v – средняя скорость газового потока, Re – число Рейнольдса, ΔP – потери давления)

Анализ показывает, что начиная с завихрителя, обеспечивающего тангенциальный ввод газа в сопловой узел для обжатия и стабилизации плазменной дуги, течение газа носит турбулентный характер ($Re = 2,3 \cdot 10^3 \div 5,2 \cdot 10^4$) [10]. Турбулентный характер течения газа в плазмотроне приводит к появлению областей интенсивных пульсаций потока, частота которых зависит от геометрии тракта и скорости газа, и вихрей, образующихся на кромках конструктивных элементов ГВТ. При совпадении частот пульсаций потока, либо частоты срыва вихря с собственными частотами участков расширения тракта устанавливается устойчивый механизм самовозбуждения, приводящий к резонансному усилению звуковых колебаний. Если характерные размеры выделенных

областей меньше длины звуковой волны (условие выполняется всегда в диапазоне звуковых частот и нижней части ультразвукового спектра), то ГВТ плазмотрона можно представить как колебательную систему с сосредоточенными параметрами, в которой плазмообразующий газ в расширениях обладает упругой реакцией, а в сужениях - инерционной.

Результаты расчетов, проведённых с учетом гидродинамических потерь по тракту плазмотрона, показали, что колебаниями воздушного потока в завихрителе можно пренебречь с точностью до $4 + 5\%$ по сравнению с влиянием последующих по тракту плазмотрона акустических масс и жесткостей. Следовательно, резонансную систему целесообразно рассмотреть для двух колебательно связанных областей сжатия и расширения в сопловом узле плазмотрона (рис.13).

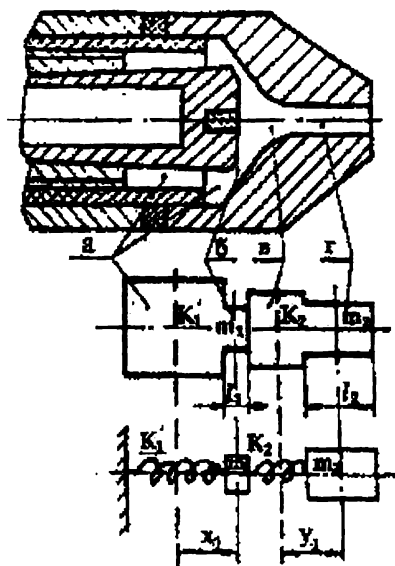


Рис. 13. Акустическая схема ГВТ плазмотрона: а, в – участки расширения, б, г – участки сужения, K_1' и K_2 – эффективные параметры упругости масс m_1 и m_2 , x_1 и y_1 – смещения масс, l_1 и l_2 – длины сужений

Уравнения колебательного движения для механического аналога такой системы можно записать следующим образом (для случая с двумя областями сужений и расширений):

$$\begin{aligned}
 m_1 \cdot \frac{d^2 x_1}{dt^2} &= -k_1 \cdot x_1 + k_2 \cdot y_1, \\
 m_2 \cdot \frac{d^2 y_1}{dt^2} &= -k_2 \cdot y_1 + k_2^1 \cdot x_1,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $m_1 = \rho S_1 l_1$ и $m_2 = \rho S_2 l_2$ - акустические массы ПОГ в сужениях; S_1 и S_2 , l_1 и l_2 - площади поперечных сечений и длины сужений (с учетом концевых поправок, равных $\approx 0,8 \cdot \sqrt{S_i}$); k_1 , k_2 и k_2^1 - жесткости расширений, равные:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= k_1^1 + k_2 = \frac{\rho c^2 S_1^2}{V_1} + \frac{\rho c^2 S_2^2}{V_2} = \rho c^2 \left(\frac{S_1^2}{V_1} + \frac{S_2^2}{V_2} \right), \\
 k_2^1 &= \frac{\rho c^2 S_1^2}{V_2},
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

x_1 , y_1 - смещения из положения равновесия масс m_1 и m_2 , соответственно; V_1 и V_2 - объемы расширений.

Решая систему уравнений (5) в виде $x = A \cdot e^{-i\omega t}$ и $y = B \cdot e^{-i\omega t}$, можно получить выражения для расчета собственных частот колебаний системы:

$$\omega_{1,0,20} = \left[\frac{1}{2} (\omega_1^2 + \omega_2^2) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\omega_1^2 - \omega_2^2)^2 + 4\mu^2 \mu_1^2 (2\pi)^4} \right]^{\frac{1}{2}},
 \tag{3}$$

где $\omega_1^2 = \frac{k_1}{m_1}$; $\omega_2^2 = \frac{k_2}{m_2}$; $\mu^2 = \frac{k_2}{4\pi^2 \sqrt{m_1 m_2}}$; $\mu_1^2 = \frac{k_2^1}{4\pi^2 \sqrt{m_1 m_2}}$.

Учет гидродинамических потерь по ГВТ плазмотрона позволяет оценить зависимость частоты пика от входного давления:

$$\Delta\omega \sim (\Delta P)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}.
 \tag{4}$$

При больших входных давлениях положение пика в спектре может измениться на 10÷15 % из-за больших потерь по тракту плазмотрона.

Интенсивность J и уровень звуковой мощности L_p можно определить, если рассмотреть колебательное движение системы под действием вынужденных сил, обусловленных пульсациями потока, по гармоническому закону вида

$$F = F_0 \cdot e^{-i\omega t} ;$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_1^2 \cdot x - 4\pi^2 \mu^2 y &= \frac{F_0}{m_1} \cdot e^{-i\omega t}, \\ \frac{d^2 y}{dt^2} + \omega_2^2 \cdot y - 4\pi^2 \mu_1^2 x &= Z \cdot \frac{dy}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

где $Z = \frac{\rho \omega^2 S_2^2}{2\pi c m^2}$ - импеданс излучения звука системой.

Из решений системы (5) мы можем выделить выражение для колебательной скорости массы m_2 :

$$v = \frac{1}{\sqrt{m_2}} \cdot \frac{dy}{dt} = \frac{k_1^2 F_0 \omega e^{-i\omega t}}{m_1 m_2 \left[(\omega^2 - \omega_{10}^2)(\omega^2 - \omega_{20}^2) \right] + i\omega Z (\omega_1^2 - \omega^2)}, \quad (6)$$

которое позволяет нам определить интенсивность J и уровень звуковой мощности L_p :

$$J = \frac{1}{2} \cdot \text{Re}(P \cdot \bar{v}) = \frac{1}{2} \cdot \text{Re} \left(\frac{F}{S_2} \cdot \bar{v} \right) = \frac{1}{2} \cdot \text{Re} (P_{10} \cdot e^{-i\omega t} \cdot \bar{v}), \quad (7)$$

$$L_p = 10 \lg \frac{JS}{P_0} = 10 \lg \frac{P_{10}^2 k_1^4 \omega^4 \rho S_2^2 |\omega_1^2 - \omega^2|}{4\pi c m_1 m_2 \left[(\omega^2 - \omega_{10}^2)^2 (\omega^2 - \omega_{20}^2)^2 + \frac{\omega^6 \rho^2 S_2^4 (\omega_1^2 - \omega^2)^2}{4\pi^2 c^2 m_2^2} \right] \cdot P_0}, \quad (8)$$

где P_{10} - давление в камере плазмотрона; $P_0 = 10^{-12}$ Вт.

Экспериментальные данные (рис. 14) показывают хорошее соответствие расчетным результатам, согласно (8). При работе на больших мощностях (при высокой температуре плазменной струи), установлено, что резонансные эффекты могут экранироваться турбулентным шумом самой струи и другими источниками шумоизлучения.

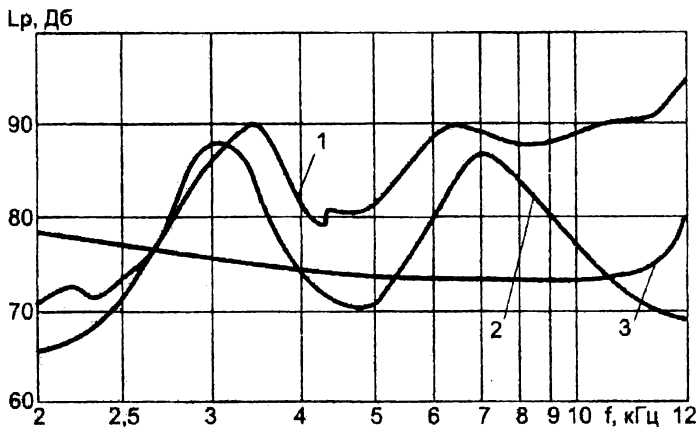


Рис.14. Узкополосный спектр звуковой мощности: 1 – плазмотрон типа ПВР, 2 – расчет по формуле (11), 3 – нормирующая кривая

Появление резонансных пиков в ультразвуковой части шумового спектра можно объяснить на основе модели, связанной с генерацией звука за счет резонансных явлений внутри цилиндрической части соплового канала. Сопловой канал представляет собой волновод длиной l и диаметром d , на одном конце которого расположен колеблющийся гипотетический поршень, а другой конец открыт и является источником звука (рис.15).

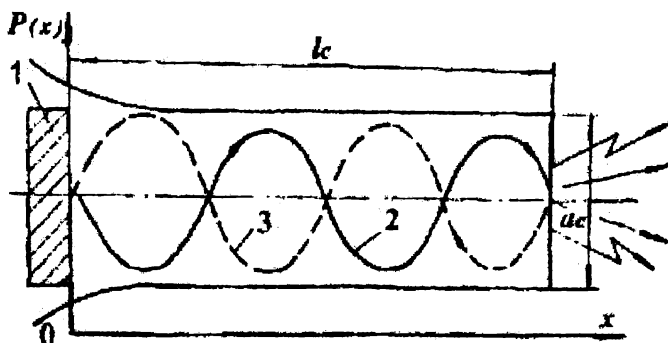


Рис.15. Акустическая схема выходного канала плазмотрона: 1 - гипотетический поршень, 2 – прямая звуковая волна, 3 – отраженная (обратная) звуковая волна, l_c и d_c – длина и диаметр сопла плазмотрона

Звуковое давление $P(x,t)$ и колебательная скорость $v(x,t)$ частиц воздуха в сопловом канале могут быть записаны в виде :

$$\begin{aligned} P(x,t) &= P_+ [e^{-ikx-ik(ct+v)t} - e^{-2\Psi} \cdot e^{-ikx-ik(ct-v)t}], \\ v(x,t) &= \frac{P_+}{\rho c} [e^{-ikx-ik(ct+v)t} + e^{-2\Psi} \cdot e^{-ikx-ik(ct-v)t}], \end{aligned} \quad (9)$$

где v - скорость потока, $\Psi = \pi\alpha_0 + i\pi\beta_0$ - характеризует отношение амплитуд и разность фаз прямых и отраженных волн. Неизвестная величина Ψ в формуле (9) может быть найдена, если импеданс (акустическое сопротивление), вычисленный по определению $Z(x,t) = \frac{P(x,t)}{v(x,t)}$ приравнять к импедансу открытого конца трубы:

$$Z_1 = \rho c [1 - 2 \frac{J_1(2ka)}{2ka}] - i\rho c M(2ka) = \rho c(\theta - i\chi). \quad (10)$$

В результате получаем:

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \frac{1}{4\pi} \ln \frac{[(1+\theta)^2 + \chi^2]^2}{(1-\theta^2 - \chi^2)^2 + 4\chi^2}, \\ \beta_0 &= -\frac{1}{\pi} \arctg \frac{2\chi}{1-\theta^2 - \chi^2} - \frac{k}{\pi} (l - vt) + \frac{n}{2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Интенсивность излучения с открытого конца соплового канала получается равной:

$$J_l = 0.5 \cdot \text{Re}[P(l,t) \cdot v^*(l,t)] = \frac{2P_+^2}{\rho c} \cdot \frac{\theta}{(1+\theta)^2 + \chi^2}, \quad (12)$$

а уровень звуковой мощности:

$$L_p = 10 \lg \frac{2SP_+^2}{P_0 \cdot \rho c} \cdot \frac{\theta}{(1+\theta)^2 + \chi^2}. \quad (13)$$

Следует заметить, что амплитуда звукового давления, создаваемого гипотетическим поршнем, P_+ является функцией частоты ω (или k) и согласно экспериментальным данным может быть аппроксимирована выражением:

$$P_+(ka) = P_{+0} \cdot ka \cdot e^{-mka} \quad (14)$$

с учётом чего (16) запишется в виде:

$$L_p = 10 \lg \frac{2SP_0^2}{P_0 \cdot \rho c} - 20mka + 20 \lg(ka) + 10 \lg \frac{\theta}{(1+\theta)^2 + \chi^2}. \quad (15)$$

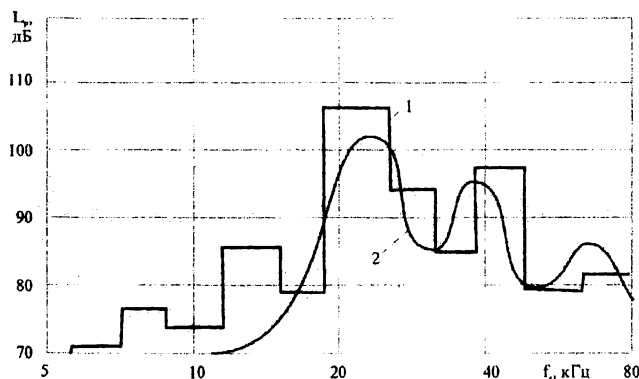


Рис.16. Уровень акустической мощности плазматрона в ультразвуковом диапазоне частот: 1 – экспериментальная кривая ($P_{\text{вх}} = 0,5$ МПа), 2 – расчет по формуле (15)

Экспериментальные исследования, проведённые для плазматрона ПВР - 402У4, показывают удовлетворительное совпадение измеренного уровня звуковой мощности и вычисленного по формуле (15) при $m = 0,45$ в высокочастотной области спектра от 20 до 50 кГц (рис. 16). При этом в спектре звуковой мощности появляется ряд гармонически повторяющихся пиков, с амплитудой, убывающей с ростом номера гармоники $\sim n^{-1.5}$. Практически регистрируются только первые 2-3 гармоники с наибольшей амплитудой.

Представленная физическая модель генерации резонансных частот в спектре шумоизлучения является хорошей иллюстрацией практического применения физических основ теории колебательных и волновых процессов и может применяться как в учебном процессе, так и при проектировании плазматронов с целью уменьшения негативного эффекта их акустического воздействия.

2.2. Газопылевое загрязнение

В ряду других факторов, воздействие которых приводит к характерным заболеваниям работающих на плазменных установках (пневмокониозы,

вазовегетативная дистония, астеноневротический синдром, полиневрит, ожоги глаз и др.), большую роль играет пылегазовыделение, вызывающее заболевания органов дыхания. В широком ряду плазменных технологий особенно опасны в этом плане ручная плазменная резка и напыление [11]. В первом случае образуются высокодисперсные аэрозоли окислов металлов в процессе испарения, конденсации паров и последующей коагуляции частиц. Будучи хорошими сорбентами, окислы металлов находятся в значительной связи с газами, образуя «сварочный аэрозоль», вдыхание которого приводит к появлению так называемой «лихорадки сварщиков». Во втором случае (напыление металлов) испарение присутствует в гораздо меньшей степени, а преобладают процессы сфероидизации частиц напыляемого материала с образованием газопорошковой смеси. Мелкодисперсная пыль, с размерами частиц 1-5 мкм, особенно алюминий, вместе с раздражающими газами легко проникают в глубокие отделы легких, вызывая развитие ларингитов, а при совместном действии с нитрогазами – ларингоспазмы.

В качестве эффективного газа при плазменной резке обычно употребляется воздух, а сам процесс сопровождается образованием вредных газов: окиси азота, двуокиси азота, озона, окиси углерода, металлического дыма. В соответствии с СН 245-71 и ГОСТ 12.1.007-76 эти вредные вещества по степени воздействия на организм человека относятся к разным классам опасности: от чрезвычайно опасного 1-го с ПДК менее $0,1 \text{ мг/м}^3$ до малоопасного 4-го (ПДК более 10 мг/м^3). Рассмотрим роль и механизмы образования этих токсичных компонент.

- *Окись азота NO*. Образуется в результате разряда при высокой температуре в смеси газов кислорода и азота. Представляет собой газ без цвета и запаха. В атмосфере превращается в двуокись азота, при высокой концентрации приобретает красновато-коричневый цвет. В организме человека легко соединяется с гемоглобином крови, превышая способность соединения CO в

1000 раз, NO_2 – примерно в 3 раза. NO окисляется в крови, образуя гемоглобин. Его увеличение приводит к недостаточности кислорода и заболеваниям центральной нервной системы.

- *Двуокись азота NO_2* . При обычной температуре в газообразном состоянии образует молекулу N_2O_4 , которая при повышенных температурах превращается в NO_2 . По свойствам близок к NO , в газообразном состоянии помимо цвета имеет возбуждающий запах. Сильно возбуждает слизистую оболочку, образуя мемогемоглобин, повреждает дыхательные пути и легкие. Поражающая способность по сравнению с NO выше в 5-10 раз. Самостоятельно NO и NO_2 почти не существуют, действуя на организм человека в виде смеси. Уже при небольших концентрациях чувствуется одышка, а при высоких – поражаются глаза, нос и верхние дыхательные пути, появляется головокружение и рвота.

- *Озон O_3* . Образуется в процессе ионизации молекул кислорода. Бесцветен, по запаху напоминает металл. Даже при низкой концентрации вызывает в организме человека сильное окисление, кашель, сухость дыхательных путей, давление в груди, боль в лобной части головы, головокружение, рвоту. При продолжительном воздействии может вызвать отек легких.

- *Окись углерода CO* . Возникает при неполном сгорании органических веществ (плазмохимия), а также при соединении CO_2 с раскаленными металлами и углеродом. В чистом виде не имеет ни запаха, ни возбуждающего воздействия. Соединяясь в легких человека с гемоглобином крови (в 300 раз эффективнее, чем кислород), препятствует снабжению организма кислородом, вызывая голодание клеток организма и его отравление.

- *Металлический дым (хьюм)*. Металлические листы стали расплавляются на участке резки и металл частично испаряется в виде мелких частиц, образуя металлическое дымовое облако. Поскольку плазменная резка является зачастую единственным способом резки сверхпрочных спецсталей, содержащих

различные легирующие добавки, оператор может подвергаться воздействию паров вредных для человека металлов. Среди различных металлических элементов специальное внимание следует уделять присутствию бериллия, особо опасного для человеческого организма. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в рабочей зоне, характерных для процессов плазменной резки, представлены в табл.3. Следует отметить, что нормы по ПДК различных вредных элементов в России более жесткие, чем в странах Евросоюза, США и Японии, что не снимает опасности воздействия, ввиду низкой производственной дисциплины их соблюдения на практике. Проведенные в Германии и Японии исследования по наличию вышеупомянутых вредных газов в процессе плазменной резки металлов показали их характерные концентрации вокруг рабочего места (на расстоянии 500-600 мм от места резки) - табл.4.

Таблица 3

ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны

Вещество	ПДК, мг/м ³	Агрегатное состояние в условиях производства	Класс опасности	Особенности действия на организм
Двуокись азота	2	Пары или газы	3	остронаправленное
Ангидрид хромовый	0,01	Аэрозоль	1	
Бериллий и его соединения	0,001	Аэрозоль	1	
Ванадий и его соединения	0,1-0,5	Аэрозоль	1-2	
Вольфрам, карбид вольфрама	6	Аэрозоль	4	фиброгенное
Кадмий и его неорг. соединения	0,05/0,01	Аэрозоль	1	
Кобальт	0,5	Аэрозоль	2	
Марганец	0,1-0,2	Аэрозоль	2	
Медь	0,5	Аэрозоль	2	
Молибден и его соединения	1-6	Аэрозоль	3	
Никель и его соединения	0,5	Аэрозоль	1	
Озон	0,1	Пары или газы	1	остронаправленное
Свинец и его соединения	0,01/0,05	Аэрозоль	1	
Углерода оксид	200	Пары или газы	4	
Алюминий и его сплавы	2	Аэрозоль	3	фиброгенное
Железа триоксид	6	Аэрозоль	4	фиброгенное
Титан и его диоксид	10	Аэрозоль	4	
Феррохром	2	Аэрозоль	3	
Чугун (смесь с электрокорундом)	6	Аэрозоль	4	
Хроматы, бихроматы	0,01	Аэрозоль	1	аллергенное
Дихрома триоксид	1	Аэрозоль	3	аллергенное
Цинка оксид	0,5	Аэрозоль	2	

Таблица 4

Концентрации вредных веществ в рабочей зоне

Ед. изм.	O ₃	NO ₂	NO	CO	хьюм
мг/м ³	0,04-0,60	0,8-0,9	1,23-122,0	22,8-100,0	0,9-12,3
ppm (промилле)	0,03	28		15	-

Очевидно, что решая вопрос о применении на производстве плазменной резки металла, необходимо предварительно продумать методы очистки производственных помещений от вредных газов, характерных для данного процесса, а в ситуации с плазменным напылением – технологию защиты от порошкообразной пыли. Следует также обращать внимание на продукты плазмохимической переработки, а также на вещества, образующиеся при использовании плазмотронов в экологических целях (при переработке бытовых и производственных отходов). Характеризуя, в целом, эффект влияния газопылевого фактора, следует отметить его широкую вариативность, обусловленную в первую очередь различием в спецификациях обрабатываемых материалов. Это осложняет детальный учет этого фактора в каждом конкретном случае плазменнодугового воздействия, но позволяет выработать общие меры, способствующие снижению его негативного влияния.

2.3. Электромагнитное воздействие

Плазма является источником излучения в диапазоне от инфракрасного до рентгеновского. Так как характерные температуры, сопровождающие процессы работы с открытой плазменной дугой (резка, сварка) составляют 8-15 тыс. К, то согласно закона Вина ($\lambda_{\max} = 2,9 \cdot 10^{-3} / T$, где T – температура, К), максимум теплового излучения должен находиться в ультрафиолетовом диапазоне длин волн $\lambda_{\max} = 190 \div 360$ нм, которое является и наиболее опасным из всех видов излучения плазменной дуги. С точки зрения здоровья, наиболее опасна область ультрафиолетовых длин волн от 250 до 300 нм (табл.5), которые могут вызвать ожоги недостаточно защищенного кожного покрова. При этом излучение на

длине волны 200 нм способствует образованию озона, имеющего свои особенности негативного воздействия на организм. Рентгеновское излучение, соответствующее температурам 10^5 К и выше в низкотемпературных плазменных технологиях, присутствует в пренебрежимо малых количествах. Тем не менее при неупругих столкновениях электронов с характерными для плазменодуговых процессов энергиями в 100-400 эВ с атомами вещества возможен эффект ионизации среды с возникновением небольших потоков β - и γ -излучения (мощность экспозиционной дозы не должна превышать 0,4 мР/ч на расстоянии 0,05 м от корпуса установки или защитной камеры).

Таблица 5

Допустимые уровни оптической облученности плазморезчиков

Область спектра	Область излучения	Длина волны, нм	Допустимая плотность потока излучения, Вт/м ²
Ультрафиолетовая	С	200-280	0,001
Ультрафиолетовая	В	280-315	0,01
Ультрафиолетовая	А	315-400	10,0
Видимая		400-760	В соответствии со СНиП 23-05-95
Инфракрасная		760-1000	140

При работе с открытой плазменной дугой необходимо защищать оператора от воздействия электромагнитного излучения, интенсивность которого в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазоне во много раз превышает физиологическую норму, достигая значений 10^7 нит по яркости (1 нит = 1 кд/м² - единица измерения яркости в СИ). Для сравнения: типичная яркость дисплея компьютера колеблется от 200 до 300 нитов. Яркость дуги в среде защитных газов возрастает, по сравнению с ручными технологиями. Особенно это заметно при плазменной обработке алюминия, когда возникает эффект многократного отражения на частицах алюминиевой пыли. В результате такого воздействия могут возникнуть патологии органов зрения (ожоги роговицы, кератит, конъюнктивит и т.д.) и кожи. Следует учитывать и тепловой эффект воздействия на организм, снижающий его защитную реакцию (допустимая

интегральная интенсивность теплового облучения не должна превышать 350 Вт/м²). Источником такого воздействия может стать и нагретый металл.

В плазмохимических процессах при использовании высокочастотных (ВЧИ) плазмотронов, работающих на токах с частотой 0,06-50 МГц и сверхвысокочастотных (СВЧ) плазмогенераторов (частоты 900-2450 МГц) следует обращать внимание на эффекты воздействия на оператора переменных электромагнитных полей, влияние которых на организм человека зависит от мощности устройства и регламентируется по ГОСТ 12.1.006-76 и СН 1742-77 (табл.6).

Таблица 6

Предельно допустимые напряженности электрических и магнитных полей

Частота поля, Гц	0	50	$6 \cdot 10^4 - 1,5 \cdot 10^6$	$(1,5-3) \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$	$(3-5) \cdot 10^7$	$(5-30) \cdot 10^7$
Напряженность электрического поля, В/м	-	$5 \cdot 10^3$	50	50	20	10	5
Напряженность магнитного поля, А/м	$8 \cdot 10^3$	-	5	-	-	0,3	-

2.4. Комбинированное воздействие вредных факторов

Эффект комбинированного воздействия пыли и газов при плазменной обработке стимулируется за счет фотохимических реакций под влиянием ультрафиолетового излучения, особенно сильно выраженного (в 25-30 раз более интенсивно, чем в воздухе) при работе плазменной дуги в среде защитных газов. В этом случае образуются токсичные компоненты в виде окислов азота и озона (до 10 ПДК в рабочей зоне при максимуме скорости образования в диапазоне 200-300 мкм), влияние которых на организм трудно дифференцировать, а совместный эффект воздействия вызывает раздражение слизистых оболочек и изменения в организме по типу фиброза (при многократном воздействии). Поскольку влияние газопорошковых смесей на организм сочетается с шумовым, ультразвуковым и электромагнитным воздействием, чувствительность организма к отдельным компонентам этих смесей может изменяться, как правило, в сторону уменьшения их ПДК. В ситуации комбинированного

воздействия физических и химических факторов среды наблюдается «синдром взаимного отягощения», когда повышенная интенсивность одного из них, понижает общую реактивность организма, увеличивая тем самым его чувствительность к действию других факторов, вызывая эффект их «взаимопотенцирования». Роль газового фактора можно считать ведущей в технологиях сфероидизации, плазменной металлургии и плазмохимии, обезвреживании продуктов переработки отходов (дожиг отходящих газов), когда шум может быть в пределах нормативных величин.

Применение ручных и полуавтоматических методов плазменного воздействия должно учитывать и статическую нагрузку на руку плазморезчика, так как масса ручных плазмотронов с подводными коммуникациями может достигать нескольких килограмм. Длительная работа в таких режимах может привести к заболеваниям нервно-мышечного аппарата плечевого пояса. Высокая (по сравнению с другими методами – рис.4) скорость плазменной резки несколько снижает остроту влияния данного фактора, но требует, тем не менее, регламентации режимов работы или применение вспомогательных устройств, снижающих статическую нагрузку.

2.5. Опасные факторы

К опасным факторам, сопутствующим электроплазменным технологиям, следует отнести воздействие электрического тока, искры и брызги, выбросы расплавленного металла и шлака, возможность взрыва газовых баллонов и систем, находящихся под давлением. В технологиях автоматического применения плазмотронов опасность представляют также механизмы перемещения плазмотрона и изделия. Наличие электрического тока и высокие температуры плазменных процессов создают предпосылки к возникновению пожароопасных ситуаций, что должно учитываться при проектировании рабочего помещения и рабочей зоны. Во избежание поражения электрическим током и другими опасными

факторами следует строго соблюдать требования к технологиям, оборудованию, процедурам и рабочему персоналу, которые изложены в соответствующих ГОСТах, СНиПах и правилах (см. приложение).

3. Методы и средства защиты от вредных производственных факторов

Универсальными мерами по предотвращению комплексного негативного воздействия на персонал в электроплазменных процессах должны стать рекомендации по автоматизации процессов, по использованию индивидуальных средств защиты, и соответствующему оборудованию рабочего места, предотвращающему распространение и усиление вредных факторов в рабочей зоне. Необходим и соответствующий регламент работы, предотвращающий превышение рекомендуемых безопасных доз облучения в соответствующих его диапазонах. При этом не надо забывать и о возможности избирательной борьбы с отдельными вредными факторами воздействия на персонал.

Анализ экспериментальных данных свидетельствует, что существенного эффекта снижения шума можно достигнуть за счёт оптимизации режимов обработки. Однако этот эффект лимитирован требованиями технологии. Следовательно, основным направлением борьбы с шумом должно стать проектирование плазмотронов путем профилирования его газовоздушного тракта, формы катодного и соплового узла, оптимизации распределения газового потока по тракту. Учет влияния профиля ГВТ на характер шумоизлучения позволяет предложить ряд конструкций плазмотронов с улучшенной (по шумовым характеристикам) гидродинамикой газового течения. В модели, представленной на рис. 17, конструктивно изменена форма сопряжения катода и соплового узла ("эквилибистный" характер профиля ГВТ, характеризующийся постоянством гидравлического диаметра D_r при незначительном снижении площади проходного сечения). Данный профиль ГВТ уменьшает общее число

резких изменений площади сечения, придав самой форме изменения профиля ГВТ более плавный характер.

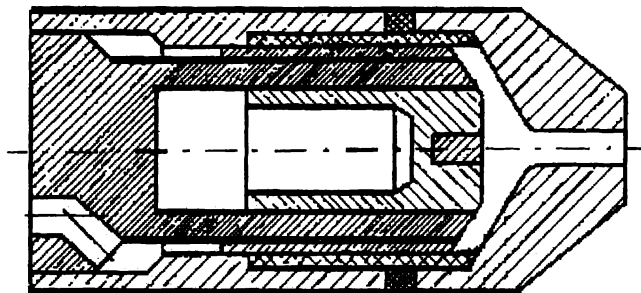


Рис.17. Плазматрон с «эквидистантным» профилем ГВТ в сопловом узле

Указанные меры позволяют снизить эффект образования дискретных тонов, образующихся за счет резонансных явлений внутри плазматрона, или сместить резонансные пики в ультразвуковую область с высоким нормируемым значением (до 110 дБ), уменьшить их амплитуду и общий уровень звуковой мощности на 10-12 дБ (рис.18).

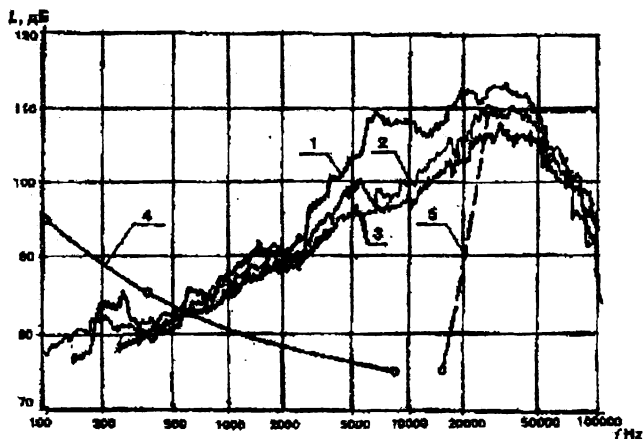


Рис. 18. Сравнительные амплитудно-частотные характеристики плазматронов (процесс резки): 1 – серийный плазматрон ПВР-402, 2 – экспериментальный плазматрон, 3 – плазматрон пониженной звуковой мощности, 4 и 5 - нормируемые уровни шума

Общий уровень акустического излучения можно дополнительно понизить за счет использования устройств и технологий по борьбе с шумом на пути его распространения. Такие устройства проектируются с учетом диаграмм направленности и спектрограмм шума плазмотронов, законов его распространения и поглощения. К настоящему времени разработаны и внедрены звукопоглощающие насадки и экраны различных типов: для резки металлов (рис.19), для термо- и химико-технологической обработки (рис.20), напыления (рис.21), позволяющие снизить как общий, так и пиковый уровень шума на 5-15 дБ (рис.22), «сгладив» спектр шумоизлучения в области высоких и низких ультразвуковых частот за счет использования методов экранирования и резонансного акустического поглощения. В условиях механизированной плазменной резки широкое применение получил звукоизолирующий экран с водяной завесой (ГКСЭ – гидрокольцевой струйный экран), позволяющий дополнительно к эффекту снижения шума (рис.23) сократить выброс в окружающую среду пыли, токсичных газов, ультрафиолетового и светового излучения. Исследования показали также перспективность использования пенной завесы для эффективного поглощения шума, газовых выделений и радиационного излучения.

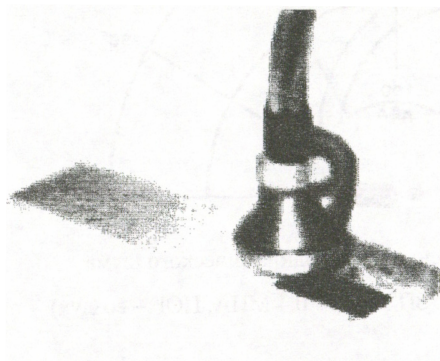


Рис.19. Глушитель шума для плазменной резки



Рис.20. Глушитель закрытого типа (ЗПЗК) для термо- химико- термической обработки

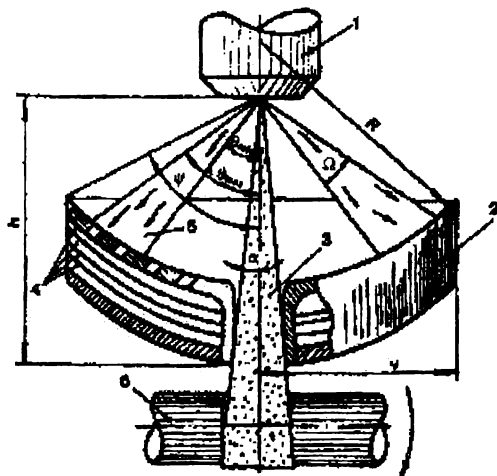


Рис.21. Звукопоглощающий экран открытого типа (ЗПЭК) для напыления:
 1 – плазмотрон, 2 – экран, 3 – струя, 4 – звукопоглощающая набивка,
 5 – направление максимального шумоизлучения, 6 – напыляемая деталь

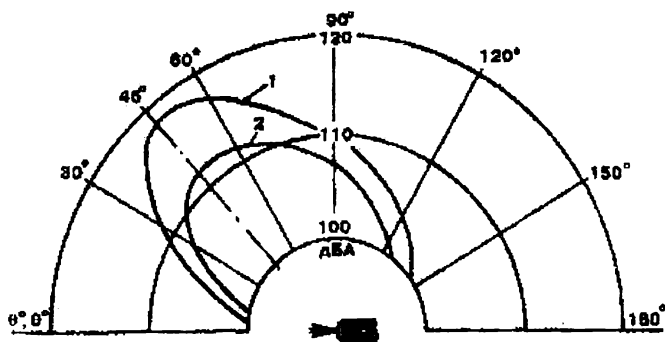


Рис.22. Диаграмма направленности аэродинамического шума
 плазмотрона (1- без ЗПЭк, 2 – с ЗПЭк, $P_{пор} = 0,4$ МПа, ПОГ – воздух)

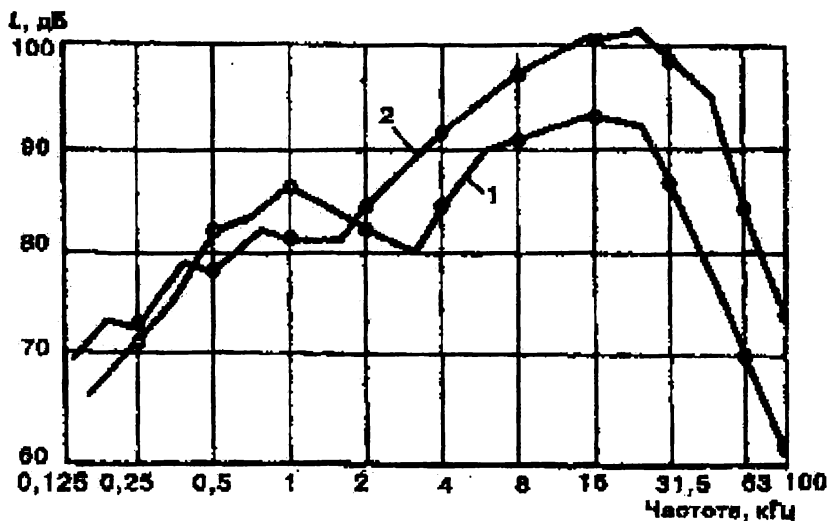


Рис.23. Влияние ГКСЭ на аэродинамический шум плазматрона: 1 – с ГКСЭ, 2 – без ГКСЭ ($I = 290 \text{ A}$, $U = 180 \text{ В}$, $P_{эс} = 0,1 \text{ МПа}$, $Q_{\text{пор}} = 4 \text{ м}^3/\text{ч}$)

Рассмотренный комплекс мероприятий по борьбе с шумом и сопутствующими ему вредными факторами в процессе использования электроплазменных технологий, а также практика промышленной эксплуатации малозумных плазматронов, свидетельствуют о возможности успешного решения проблемы акустической безопасности при сохранении требуемой эффективности и качества труда.

Обеспечение требований безопасности электроплазменных технологий не должно ограничиваться мерами по борьбе с шумовым загрязнением. Учет особенностей возникновения и влияния газопылевого фактора позволяет сформулировать общие рекомендации по борьбе с ним. Это, во-первых, автоматизация процесса, с удалением оператора от зоны плазменного воздействия и оборудование этой зоны системой вытяжной вентиляции. Однако, возникновение тепловых потоков, неизбежно сопутствующих плазменным технологиям, может приводить к распространению газов и паров на значитель-

ные расстояния от источника их образования. В связи с этим, а также при использовании ручного плазменного оборудования, необходимо применять индивидуальные средства защиты (ИСЗ) органов дыхания и регламентировать режимы работы рабочего персонала. В процессах плазменной резки хорошо себя зарекомендовали меры, либо препятствующие выделению газов в воздух рабочей зоны за счет их сорбции водой (резка на водяном столе и с использованием гидравлического экрана), либо способствующие их эффективному удалению из зоны резки. В последнем случае можно обратить внимание на очистительные устройства, работающее по принципу всасывания образующихся вредных газов из зоны, находящейся ниже уровня резки (эти газы тяжелее воздуха) с последующей их очисткой по принципу центробежного разделения взвешенных в воздухе частиц. Наиболее эффективным является отсос газов и загрязнений в сторону от плазменной дуги, так как твердые частицы быстро засоряют каналы для отсоса воздуха и уменьшают его производительность.

Для создания на рабочем месте атмосферы, с концентрациями вредных веществ, не превышающих ПДК, необходимы подача чистого и отсос загрязненного воздуха. Однако воздухообмен должен осуществляться таким образом, чтобы вентиляция не нарушала условий работы плазменной дуги. Мощность вентиляционной установки зависит от выполняемой работы, материалов, размеров помещения. В закрытых помещениях она может колебаться от 30 до 100 м³/ч. Соответствующим должен быть и объем подводимого чистого воздуха, чтобы не возникли явления, вызванные сквозняком. В холодное время воздух надо предварительно подогревать.

Мерами по предотвращению негативного воздействия электромагнитного излучения на персонал являются рекомендации, аналогичные защите при электродуговой сварке: использование ИСЗ (светофильтров), автоматизация процессов и оборудование рабочего места, предотвращающее распространение и усиление излучения за счет эффектов отражения. Следует только учесть, что

мощность излучения плазменных горелок гораздо выше, чем электродуговых, что требует дополнительных мер по защите, в первую очередь, зрения операторов. Рекомендуется также хорошо освещать помещения, в которых они работают, с целью достаточного снижения контраста излучения с освещением. Необходим и соответствующий регламент работы, предотвращающий превышение рекомендуемых безопасных доз облучения в соответствующих его диапазонах. Применение высоко- и сверхвысокочастотных плазмотронов желательно, осуществлять в автоматическом режиме во избежание воздействия на оператора соответствующего этим частотам электромагнитного излучения.

4. Плазменные технологии как элемент безопасности окружающей среды

Масштабы загрязнения окружающей среды увеличиваются вместе с ростом экономики России. Темпы нарастания экологических проблем делают актуальными задачи переработки и обезвреживания отходов производства и потребления, требующих рациональных и эффективных решений в общей политике ресурсосбережения и экологически грамотного природопользования. Методы утилизации и обезвреживания можно разделить по технологическому принципу на биологические, термические, химические, механические и смешанные. Плазменный метод относится к сфере высокоэнергетического воздействия на материалы, включающей в себя более 30 высокотемпературных технологий, среди которых он занимает весьма достойное место.

Утилизация металлоотходов – необходимая задача для любого промышленно развитого региона, имеющая эффективные технологические решения с применением плазменных технологий резки. В настоящее время только по северу Тюменской области объем металлоотходов, требующих разделки и вывоза, составляет не менее 5 млн. тонн. Около 100 тыс. тонн металлов в год переходит в водные растворы, загрязняя ионами тяжелых

металлов поверхностные и подземные источники хозяйственного водоснабжения, нанося ущерб окружающей среде (до 800 млн. руб. в год). Использование передвижных плазменных установок позволяет вести процесс утилизации металлов в полевых условиях. Как свидетельствует опыт, несмотря на значительное энергопотребление, высокая скорость плазменной резки обеспечивает большую эффективность разделки, а применение воздуха в качестве плазмообразующего газа делает процесс разделки и утилизации металлолома доступным и рентабельным.

Сфера плазменного обезвреживания захватывает сразу несколько направлений и включает в себя переработку не только промышленных, но и бытовых отходов, имея свои специфические черты в технологиях утилизации твердо- и жидкофазных отходов, а также газообразных продуктов их переработки.

Применение плазмотронов для *обезвреживания жидкофазных сред* обусловлено тем, что многие из них относятся ко 2-му классу наиболее опасных отходов (масла, эмульсии, нефтешламы), образующих при низкотемпературном воздействии опасные продукты переработки - галоидированные диоксины и диоксиноподобные вещества. Высокотемпературные плазменные режимы приводят к необратимому разрушению таких веществ. Конечным продуктом в таких технологических схемах являются экологически безопасные газовые выбросы, и технологически возвратные продукты в виде тепла и слабых кислотных растворов сернистых и хлористых компонент утилизируемого сырья. Для обезвреживания галогеносодержащих жидкофазных отходов можно использовать методику высокотемпературного пиролиза в пироплазме, в которой отходы вводятся прямо в плазменную дугу. Процессы термической деструкции происходят в объеме плазмохимического реактора (ПХР) – рис.24, обеспечивающего одновременно и режим водоземulsionного испарения жидкофазных отходов, поступающих в плазмотрон после необходимой стадии предварительной подготовки в барботере, обеспечивающем процесс смешения

галогеносодержащих жидких отходов с водой с образованием эмульсии, нагреваемой и испаряемой за счет нагревательных элементов ПХР. Перегретые пары направляются в плазмотрон в качестве компоненты плазмообразующего газа (ПОГ), где происходит их термическое разложение. При таком сжигании паров эмульсии интенсифицируется процесс горения топлива. Это обеспечивается использованием кислорода и водорода, образующихся при частичной термической диссоциации воды в зоне горения и многократным дроблением органических микрокапель в результате тепловых микровзрывов, увеличивающих поверхность контакта органики с окислителем. В результате происходит более полное сгорание отходов, исключается химический и механический недожог. Повышение эффективности деструкции и КПД процесса достигается также за счет применения оригинальной технологии рекуперативного тепло-массообмена в схеме плазмотрон-реактор-система подготовки сырья для пироплазмы, когда образующийся нагретый газ после плазмотрона направляется внутрь плазмохимического реактора, где производит дополнительный нагрев змеевика. В ходе данного процесса можно обезвредить до 100 литров жидкофазных отходов за смену.

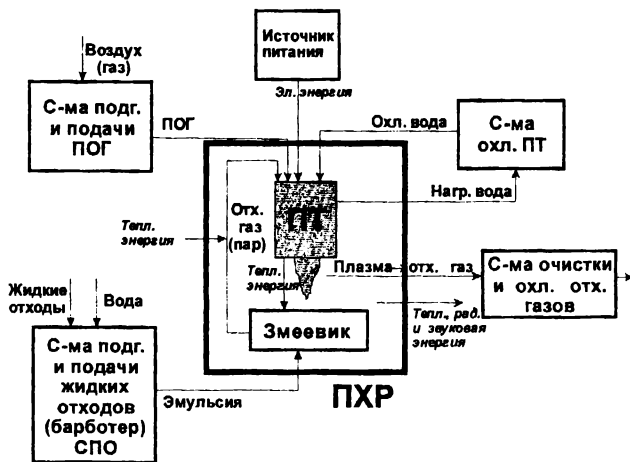


Рис.24. Технологическая схема плазменного обезвреживания жидкофазных отходов

К специфическим продуктам переработки можно отнести *медицинские отходы*: перевязочные и шовные материалы, операционные отходы, пластмассы и керамика, изделия из резины и кожи, гипсовые повязки. В Российской Федерации их количество в больницах достигает в среднем 250 кг в год на одну койку, образуя ежегодно до 1 млн. тонн медицинских отходов. Оптимальным способом обезвреживания опасных (инфицированных) отходов является их термическая переработка – сжигание. Однако при прямом сжигании или пиролизе медицинских отходов на частицах летучей золы в споровой форме могут существовать микроорганизмы, которые, попадая с дымовыми газами в окружающую среду, переходят в вегетативную форму. Для их полного уничтожения необходимо создание температуры, превышающей пределы выживаемости спорных форм. Решить данную задачу можно также с использованием плазменных технологий, одна из которых показана на рис. 25.

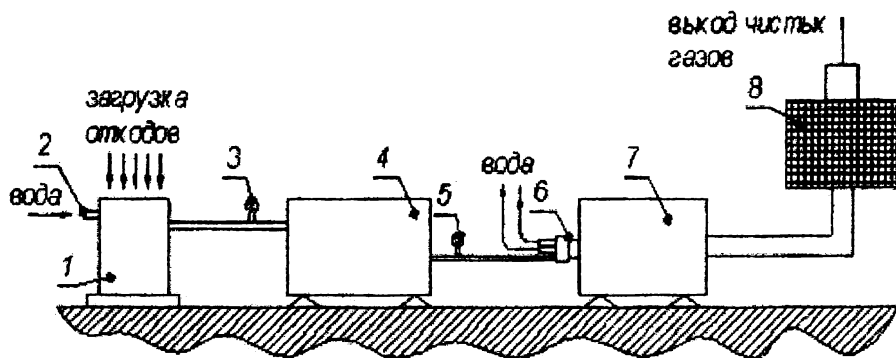


Рис. 25. 1 – ТХР, 2 – штуцер для снижения температуры газов, 3 и 5 – датчики давления газов, 4 – ресивер, 6 – плазматрон, 7 – ПХР, 8 – фильтры

Технология осуществляется в несколько стадий. На предварительном этапе происходит сжигание твёрдой массы отходов в расплаве солей нитрита натрия в термохимическом реакторе (ТХР) 1 с образованием смеси газов. Далее они поступают в ресивер 4, предназначенный для временного хранения и понижения давления. В ресивере происходит накопление газа, и

создание давления (2-5 атм.), необходимого для работы плазмотрона. После него через регулятор давления 5 смесь попадает в струю высокотемпературной плазмы плазмотрона 6, где происходит их повторное сжигание в плазмохимическом реакторе (ПХР) 7. Газ, проходя путь по каналу и факелу плазматрона, подвергается воздействию высоких температур в течение 2-3 секунд, что обеспечивает полную деструкцию опасных веществ. Последним этапом является очистка газов от оставшихся примесей за счет пропускания их через фильтры 8. Для эффективного функционирования установки требуются стандартные вспомогательные системы, обеспечивающие работу плазмотрона.

Среди множества задач *переработки твердых техногенных отходов*, решаемых плазменными методами, выделим возможность переработки содо-сульфатных смесей (ССС) – экологическую и экономическую проблему Уральских предприятий алюминиевого цикла, использующих бокситы с высоким содержанием серы. Содо-сульфатная смесь, состоящая из Na_2SO_4 (~80% по массе), Na_2CO_3 (~20%) и Al_2O_3 (~1%), из-за проблем, периодически возникающих на рынках сбыта, накапливается на открытых площадках в ежегодных количествах от 25 до 30 тысяч тонн (данные по Богословскому алюминиевому заводу), нанося экологический ущерб окружающему региону. Для обезвреживания таких отходов можно применить методику их высокотемпературной деструкции в пироплазме, в которой отходы вводятся непосредственно в плазменную дугу. При этом сами отходы поступают в плазмотрон [12], пройдя предварительную стадию механической деструкции в шнековом или тарельчатом питателе загрузочного устройства (рис.26). В условиях низкотемпературной плазмы в плазмохимическом реакторе (ПХР) автоматически идут процессы деструкции карбоната и сульфата натрия ($\text{Na}_2\text{CO}_3 = \text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2$ (при температурах выше 900 °С) и $\text{Na}_2\text{SO}_4 = \text{Na}_2\text{O} + \text{SO}_3$ (при температурах свыше 1500 °С)) с получением шлака, содержащего вредные для здоровья оксиды

азота Na_2O_x и Al_2O_3 , который можно вернуть в производство, утилизируемых газовых выбросов (CO_2 , SO_3) и небольшой доли (8-12%) вторичной пыли. При пропускании газовых выбросов через мокрый скруббер образуется слабый раствор кислоты, который можно использовать для нейтрализации щелочных стоков завода. Для уменьшения уровня выбросов до нормируемого уровня вторичная пыль может быть отправлена либо в дожигатель, либо дополнительно пропущена через плазменный реактор, либо продана как товарный продукт (100% Na_2SO_4).

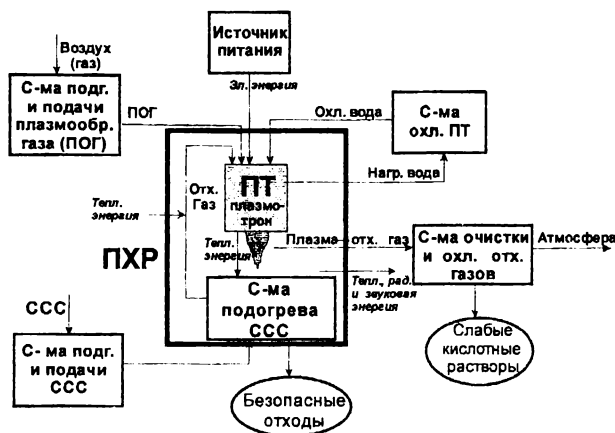


Рис.26. Материально-энергетическая схема метода плазменного обезвреживания содо-сульфатных отходов

Проявляемый в последнее время в России широкий интерес к термическим методам *переработки твердых бытовых отходов (ТБО)*, активизация деятельности по строительству мусоросжигательных комплексов и заводов обуславливает интерес и к плазменным методам утилизации. В широком ряду термических технологий, применяемых в схемах комплексной переработки ТБО, наиболее признание по эколого-экономическим показателям получили технологии паровоздушной газификации и слоевого сжигания на колосниковых решетках, применяемые на большинстве заводов Германии и на ряде заводов в России (МСЗ №2 в Москве). Применение плазмотронов в схемах

многостадийной деструкции отходов эффективно на стадии дожигания газов, отходящих из печей сжигания ТБО, для повышения экологической эффективности обезвреживания (уничтожения диоксинов, бифенилов и бифуранов), а также для остекловывания нелетучих продуктов предварительного пиролиза с целью их дальнейшей безопасной утилизации или возврата в производство. Эффективность использования плазменных технологий может повышена за счет использования органической составляющей продукта переработки - сингаза (смесь СО и Н), который используется либо как химическое сырье, либо для производства электрической энергии путем сжигания в турбо- либо дизель- генераторах (табл.7).

Таблица7

Стоимость переработки отходов, евро/т [данные ИПЭФ РАН]

Технология	Складирование на полигонах	Традиционное сжигание	Пиролиз, термолиз	Плазменный метод без получение сингаза (СО + Н)	Плазменный метод с получением сингаза
Удельная себестоимость	105-160	100-140	90-150	100-120	70-80

Следовательно, плазменные технологии утилизации ТБО, могут быть экологически и экономически эффективными как в рамках комплексных решений их переработки, так и для решения локальных задач обезвреживания отдельных видов отходов. В связи с этим, целесообразно использовать плазмотроны, либо в ситуациях, когда высокотемпературный метод является единственно необходимым по санитарно-эпидемиологическим и экологическим требованиям (кремация, обезвреживание радиоактивных или инфицированных отходов), либо на отдельных стадиях комплексных технологий утилизации отходов (например, мусоросжигание) для дожигания отходящих газов, требующих, как правило, дополнительного высокотемпературного обезвреживания.

Комплексный анализ экологической проблемы, выбор оптимальной плазменной технологии и соответствующего ей конструктивного решения, позволяет сделать плазмотрон эффективным инструментом в сфере утилизации

отходов и улучшения экологической обстановки индустриально развитых районов России.

Заключение

Представленные в данной работе сведения о причинах возникновения и методах борьбы и защиты от вредных и опасных факторов, сопутствующих электроплазменным процессам, являются общими для плазмотронов большинства типов. Следует, однако, констатировать, что между различными типами плазмотронов в разных областях их применения различия настолько велики, что практически для каждого рабочего места или каждой технологической операции следует индивидуально решать вопросы безопасности работ и защиты здоровья обслуживающего персонала и его окружения. Общий перечень процедур, регламентирующих вопросы безопасности, можно найти в ГОСТах и санитарных нормах, представленных в данной работе. Не надо забывать об этих требованиях и на стадии проектирования нового электроплазменного оборудования, внедрение которого имеет большой инновационный потенциал. Проблема безопасности, понятая в широком смысле обеспечения приемлемых для здоровья человека условий жизни, также должна затрагивать и вопрос использования плазменных технологий в экологических проектах. Комплексный подход, обеспечивающий одновременно эффективность и безопасность применения таких технологий, позволяет сделать процесс их внедрения одним из ведущих направлений инновационной политики.

Библиографический список

1. Безопасность технологических процессов и производств (Охрана труда): учеб. пособие для вузов/ П.П. Кукин, В.Л. Лапин, Н.Л. Пономарев и др. – 2-е изд., испр. и доп. М.: Высш. шк., 2002. – 319 с.
2. Безопасность производственных процессов: Справочник/ С.В. Белов, В.Н. Бринза, Б.С. Векшин и др.; Под общ. ред. С.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 448 с.
3. Дресвин С.В., Зверев С.Г. Плазмотроны: конструкции, параметры, технологии: Учеб. пособие. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 208 с.
4. Электродуговые генераторы термической плазмы/ М.Ф. Жуков, И.М. Засыпкин, А.Н. Тимошевский и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. предпр. РАН, 1999. – 712 с. – (Низкотемпературная плазма. Т.17).
5. Высокоэнергетические процессы обработки материалов/ О.П. Солоненко, А.П. Алхимов, В.В. Марусин и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 2000. – 425 с. – (Низкотемпературная плазма. Т.18).
6. В. Ф. Журавлев, В. Я. Шевченко. Структурно-функциональный метод изучения технических объектов и исследований: монография – Екатеринбург: Издательство РГППУ, 2007. – 90 с.
7. Межотраслевые правила по охране труда при электро- и газосварочных работах. ПОТ Р М-020-2001. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2009. – 80 с.
8. Борьба с шумом на производстве: Справочник/ Е.Я. Юдин, Л.А. Борисов, И.В. Горенштейн и др.; Под общ. ред. Е.Я. Юдина – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.
9. Пыкин Ю.А., Анахов С.В., Стеклов О.В. Шумообразующие факторы в технологиях высокоэнергетического воздействия на материалы//Сварочное производство, 2004, №10, С. 47-50
10. Анахов С.В., Пыкин Ю.А. Сравнительный анализ газодинамических факторов шумоизлучения плазмотронов//Сварочное производство, 2005, №1, С.31-36
11. Фридланд Л.Г. Значение неблагоприятных производственных факторов в возникновении и течении некоторых заболеваний: М. «Медицина», 1966. – 150 с.
12. Пыкин Ю.А., Анахов С.В., Шакуров С.А., Тетюков А.Г. Патент на полезную модель «Плазмотрон» №67909. От 22.05.2007.

Перечень основных нормативных правовых актов, регламентирующих вопросы обеспечения безопасности электроплазменных процессов

№ п/п	Документ	Название документа
1	ГОСТ 12.3.039-85	ССБТ. Плазменная обработка металлов. Требования безопасности.
2	ГОСТ 12221-79	Аппаратура для плазменно-дуговой резки металлов. Типы и основные параметры.
3	Федеральный закон от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ, ст. 14	Об основах охраны труда в Российской Федерации.
4	ПОТ Р М-016-2001	Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок.
5	ГОСТ 12.1.004-91	ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
6	ГОСТ 12.1.005-88	ССБТ. Воздух рабочей зоны. Требования безопасности. Общие санитарно-гигиенические требования.
7	ГОСТ 12.2.032-78	ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
8	ГОСТ 12.2.033-78	ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования.
9	ГОСТ 12.2.049-80	ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.
10	ГОСТ 12.4.013-85	ССБТ. Очки защитные. Общие технические условия.
11	ГОСТ 12.4.023-84	ССБТ. Щитки защитные. Общие технические требования и методы контроля.
12	ГОСТ 12.4.034-85	ССБТ. Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Классификация и маркировка.
13	ОСТ 21-6-87	Светофильтры стеклянные для защиты глаз от вредных излучений на производстве.
14	СНиП 2.04.05-91 (с изменениями, внесенными в 1994 и 1997 г.)	Отопление, вентиляция и кондиционирование.
15	СНиП 23-05-95	Естественное и искусственное освещение.
16	СН 2.2.4/2.1.8.562-96	Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданиях.
17	ПБ-03-273-99	Правила аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства.
18	ПУЭ	Правила устройства электроустановок. 1998 г.
19	ППБ-01-93	Правила пожарной безопасности от 14.12.1993 г.
20	СП	Санитарные правила по сварке, наплавке и резке металлов. № 1009-73, от 5.03.1973 г.

Оглавление

Введение.....	3
1. Электроплазменные технологии.....	4
2. Опасные и вредные факторы.....	10
2.1. Шумовой фактор.....	12
2.2. Газопылевое загрязнение.....	23
2.3. Электромагнитное воздействие.....	27
2.4. Комбинированное воздействие вредных факторов.....	29
2.5. Опасные факторы.....	30
3. Методы и средства защиты от вредных производственных факторов...	31
4. Плазменные технологии как элемент безопасности окружающей среды	37
Заключение.....	44
Библиографический список.....	45
Приложение.....	46

Учебное издание

Анахов Сергей Вадимович

**ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ
ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Учебное пособие

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 12.12.09. Формат 60×84/16. Бумага для множ. аппаратов. Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 2,1. Тираж 50 экз. Заказ № 31-р

ГОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет». Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.

Ризограф ГОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет». Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.