

## **ИНИЦИИРОВАНИЕ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКАХ ПЛАЗМЫ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Вакуумно-дуговые источники плазмы, являясь одним из основных устройств ионно-плазменной обработки изделий, во многом определяют производительность процессов и качество получаемого поверхностного слоя. Надежность и долговечность работы таких источников непосредственно зависят от того, каким образом в каждом конкретном случае в них решена проблема возбуждения дуги. Пренебрежение этим вопросом на годы задержало развитие ряда ионно-плазменных технологических процессов и их автоматизацию [1].

Исследования по возбуждению вакуумно-дугового разряда и его стабилизации в технологических источниках плазмы, начатые в середине 70-х годов в Харьковском физико-техническом институте (ХФТИ), привели к созданию достаточно надежно работающих в стационарном режиме источников плазмы с автостабилизацией и магнитным удержанием катодного пятна (КП). Однако проблема создания систем инициирования (СИ) разряда, обеспечивающих надежную работу импульсных источников плазмы с ресурсом более  $10^6$  срабатываний, что необходимо при реализации некоторых перспективных технологических процессов, осталась нерешенной. В дальнейшем работы по созданию эффективных систем возбуждения дуги были продолжены в ХФТИ, а затем и в ХАИ и ведутся по настоящее время.

### **1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА К НАСТОЯЩЕМУ МОМЕНТУ**

Возможные методы возбуждения вакуумной дуги, в основном применительно к вакуумным коммутаторам, рассмотрены в ряде работ [2 – 4]. Непосредственное использование этих методов для запуска технологических источников плазмы в связи с небольшой напряженностью электрического поля между основными электродами, создаваемой используемыми низковольтными блоками питания дугового разряда, является неэффективным. Эта задача была успешно решена в «двухступенчатых» системах запуска, в которых пусковой разряд по поверхности диэлектрика инициировал возникновение вспомогательного, гораздо более мощного разряда, заполнявшего своей плазмой основной межэлектродный промежуток, что приводило в итоге к зажиганию вакуумно-дугового разряда [5, 6]. К сожалению, применявшиеся в качестве заполнителя пускового разрядного промежутка различные сорта керамики (22ХС, М-7 и др.) обеспечивали

ресурс первой ступени запуска (пускового инжектора), не превышающий  $10^4 - 10^5$  срабатываний [7].

Поиск возможностей повышения долговечности пусковых устройств привел к появлению новых композиционных материалов (КМ), отличающихся повышенной устойчивостью к воздействию электрических разрядов и низким напряжением поверхностного пробоя (до 100...200 В/мм) [7, 8]. Такие характеристики обеспечиваются особенностями структуры КМ, представляющей собой диэлектрическую стекловидную матрицу, заполненную мелкодисперсными частицами проводящих и полупроводниковых компонентов. Применение таких материалов для заполнения разрядного промежутка пусковых устройств существенно повышает их ресурс (как минимум, на один-два порядка).

К настоящему моменту в той или иной мере исследованы две основные разновидности СИ – «контактные» и «бесконтактные». В контакт-ных начальный сгусток плазмы создается разрядом между поджигающим электродом и основным катодом, разделенных керамическим или иным материалом. В «бесконтактных» отсутствует непосредственный контакт элементов поджига с катодом, а пусковую плазму генерирует автономный плазменный инжектор. Контактный поджиг, основными режимами функционирования которого являются искровой поверхностный пробой и электрический взрыв проводящей перемычки, характеризуют простота осуществления и достаточная надежность при определенных условиях работы источника плазмы. Более широкий диапазон применения имеют системы запуска с использованием пускового инжектора, обладающие повышенной универсальностью за счет легкости замены отработавшего инжектора.

Интерес к запуску технологических источников плазмы путем перехода различных разновидностей тлеющего разряда в вакуумно-дуговой (ПТД) был вызван соображениями, основанными на том, что в этом случае пусковая плазма может создаваться системой электродов достаточно больших размеров. При этом изготовление их массивными и в принципе водоохлаждаемыми резко повышает устойчивость электродной системы против разрушающего воздействия дугового разряда, что особенно необходимо в импульсном режиме работы. Кроме того, поскольку КП дугового разряда, инициируемое тлеющим разрядом, в определенных условиях с равной вероятностью возникает в любой точке рабочей поверхности катода, то эрозия последнего даже в импульсном режиме достаточно равномерна, в связи с чем снимаются ограничения по размерам катода, тем самым повышая ресурс источника плазмы.

Наиболее рациональное использование рассмотренных систем для запуска источников плазмы, применение в них КМ и использование ПТД возможны после комплексного исследования всех аспектов их поведения в составе СИ дугового разряда. К настоящему моменту часть

этих исследований выполнена, другая часть продолжается. В данной работе проведена систематизация выполненных исследований и представлены последние результаты.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1 Основные критерии надежности и долговечности систем инициирования

За основной критерий надежности системы запуска источников плазмы была взята вероятность возбуждения вакуумно-дугового разряда  $W$  определяемая как

$$W = (n/N) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $n$  - число актов зажигания разряда;  $N$  - общее число актов возбуждения разряда (число импульсов поджига, поданных на СИ источника плазмы).

Под долговечностью СИ понимают ее ресурс, определяемый общим числом срабатываний до ее отказа. При этом отказом считается как полный выход системы из строя, так и снижение вероятности возбуждения с ее помощью вакуумно-дугового разряда ниже определенной величины (обычно ниже 90%).

Исследование указанных основных характеристик СИ, а также интегральных эрозионных характеристик пусковых инжекторов и динамика электродных пятен выполнялось на экспериментальной установке, описанной в [9].

Условия испытаний, за исключением оговоренных в подрисуночных подписях, были следующими: материал катода - титан ВТ-1-00, диаметр – 60 мм; напряжение холостого хода источника питания дуги  $U_0 = 65$  В; ток дуги  $I_d = 100$  А, амплитуда пускового импульса  $U_n = 500$  В; емкость пускового конденсатора  $C_n = 40,0$  мкФ; рабочий газ – азот. В качестве материала вставки, заполняющей по пусковой разрядный промежуток, применялась керамика 22ХС, М-7 и композиционные материалы [7, 8]. Для начального снижения пробивного напряжения поверхность керамических вставок покрывалась слоем аквадага.

### 2.2. Исследования контактных систем инициирования

Применение искрового разряда для зажигания дуги низкого давления в технологических плазменных устройствах имеет свои особенности, которые обусловлены низким напряжением источников питания дугового разряда, большими межэлектродными расстояниями, а также тем, что возбуждение дуги осуществляется на холодном катоде. Долговечность поджигающего искрового устройства при этом определяется зачастую не столько параметрами искрового разряда, сколько воздействием на его элементы привязок и плазмы основного дугового разряда. В этой связи при выборе конструкции катодно-пускового узла необходимо учитывать не только условия по

обеспечению оптимального возбуждения катодного пятна, но и требования по защите элементов узла поджига от воздействия основного дугового разряда, например, путем отвода КП от места его инициации на рабочую поверхность катода. Простота рассматриваемого способа зажигания дуги, легкость его реализации объясняет частые попытки его практического использования в различных конструктивных исполнениях плазменных устройств [1]. В этой связи получение экспериментальных данных по пусковым и ресурсным характеристикам устройств, реализующих зажигание вакуумно-дугового разряда вспомогательным искровым разрядом, представляет определенный практический интерес.

Конструктивное исполнение исследованных вариантов пусковых устройств контактного типа представлено на рис. 1.

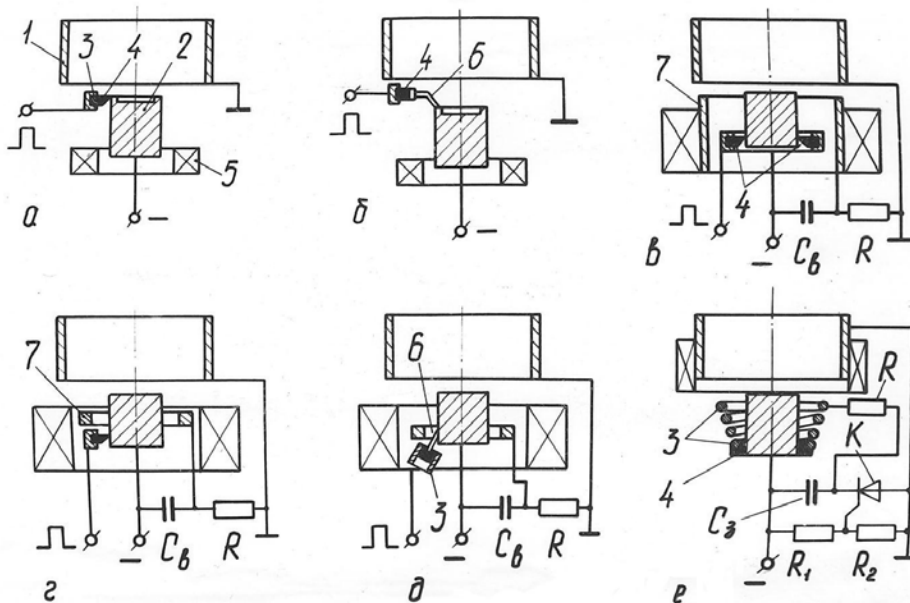


Рисунок 1 – Искровые поджигающие устройства контактного типа:  
1 – анод; 2 – катод; 3 – поджигающий электрод; 4 – диэлектрическая вставка; 5 – соленоид; 6 – «клюв»; 7 – вспомогательный анод

В результате испытаний установлено, что при достаточно высокой вероятности зажигания дуги ресурс поджигающих устройств (рис.1, а и б) не превышает нескольких тысяч срабатываний по причине интенсивной эрозии элементов 3, 4 и 6 узлов поджига, в основном за счет активного воздействия со стороны КП основного разряда

В вариантах рис.1, г и д элементы пускового устройства защищены от разрушения дуговым разрядом установкой вспомогательного анода 7 и удалением от рабочего торца катода. Эти меры обеспечивают повышение долговечности узла поджига. Однако при этом наблюдается снижение надежности запуска. Так, для варианта рис. 1, д, при  $p = 5 \cdot 10^{-2}$  Па,  $H = 1,6 \cdot 10^4$  А/м и  $U_n = 350$  В вероятность зажигания дуги  $W$  в устройстве составляет всего 30 %. Низкое значение  $W$  объясняется,

по-видимому, экранировкой места инициации КП от анода и удалением узла поджига от рабочего торца катода. Демонтаж из устройства электрода 7 повышает  $W$  до 40 % при  $U_0 = 65$  В и до 60 % при  $U_0 = 130$  В. В варианте поджигающего устройства, показанного на рис. 1, в, изменение геометрии электрода 7 и применение четырех вставок 4 позволило при дос-таточном ресурсе обеспечить высокую надежность возбуждения дуги. При этом эксперименты показали значительную зависимость вероятности зажигания вакуумно-дугового разряда  $W$  от давления газа и напряженности магнитного поля, создаваемой катушкой 5 (рис. 2). Такая зависимость, очевидно, является следствием роста напряжения горения дуги  $U_0$  с увеличением магнитного поля в диапазоне пониженных давлений газа (рис. 3). При низком значении  $U_0$  (65...130 В), вероятность погасания дуги по мере роста падения напряжения на ней резко возрастает, а среднестатистическое время горения КП уменьшается до долей секунды, что и проявляется в виде снижения вероятности зажигания дуги.

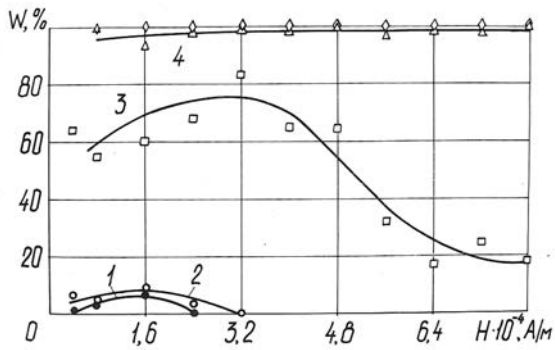


Рисунок 2 – Влияние магнитного поля на вероятность зажигания дуги: 1 –  $p = 1,3 \cdot 10^{-3}$  Па; 2 –  $p = 1,3 \cdot 10^{-2}$  Па; 3 –  $p = 1,3 \cdot 10^{-1}$  Па; 4 –  $p = 1,3$  Па

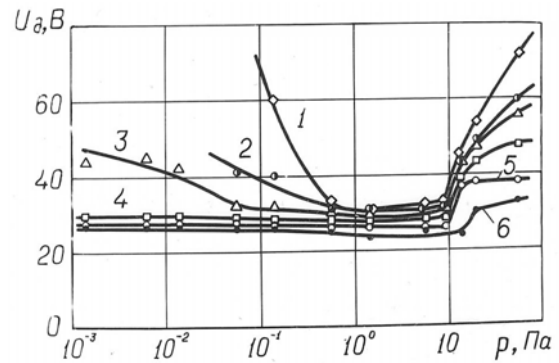


Рисунок 3 – Напряжение горения дуги в зависимости от давления азота: 1 –  $H = 8 \cdot 10^4$  А/м; 2 –  $H = 6,4 \cdot 10^4$  А/м; 3 –  $H = 5,28 \cdot 10^4$  А/м; 4 –  $H = 3,2 \cdot 10^4$  А/м; 5 –  $H = 1,6 \cdot 10^4$  А/м; 6 –  $H = 8 \cdot 10^3$  А/м

Представляет практический интерес вакуумно-дуговое устройство, схема которого представлена на рис. 1, е. В этом устройстве поджигающий электрод 3 и вспомогательный анод 7 выполнены единым конструктивным элементом в форме усеченной конусообразной спирали. Данные конструктивные особенности, во-первых, не препятствуют конденсации на поверхность пускового разрядного промежутка части металла, испаряемого КП в процессе работы устройства, а во-вторых, существенно облегчают выход КП от места инициации на рабочий торец катода. При этом магнитное поле, под действием которого происходит перемещение КП, создается током самого пускового разряда.

СИ такого устройства не требует отдельного блока питания и работает в автоматическом режиме от источника питания дуги. Такой режим обеспечивается соответствующим образом подключенными

тиристором  $K$ , делителем  $R_1$ ,  $R_2$  и запирающим конденсатором  $C_3$  [10, 11]. Для надежного возбуждения дугового разряда в источнике плазмы, необходимо, чтобы в период его работы успевала восстанавливаться металлическая пленка на поверхности диэлектрика, разрушенная в процессе поджига. Расширение режимов работы может быть получено изменением количества вставок 4 (см. рис. 1).

### 2.3. Зажигание вакуумно-дугового разряда при помощи плазменного инжектора

Возбуждение вакуумной дуги с помощью импульсного инжектора плазмы относится к так называемым бесконтактным способам зажигания и рассмотрено в ряде работ [1, 5, 6]. Широкое распространение данного способа обусловлено, прежде всего, тем, что он имеет ряд преимуществ перед контактным способом зажигания дуги. К этим преимуществам относятся: отсутствие явления привязки катодного пятна; меньшая степень разрушающего воздействия на элементы поджига вакуумно-дугового разряда; большая технологичность из-за отсутствия необходимости в регулировке положения и закрепления элементов поджига всякий раз по мере срабатывания катода или при его замене. Несомненным преимуществом является также возможность изготовления и использования пускового инжектора в виде отдельной, унифицированной «свечи» поджига.

Исследования возбуждения дуги пусковым инжектором выполнялись с использованием двухступенчатой системы запуска [5, 6], показанной на рис. 4.

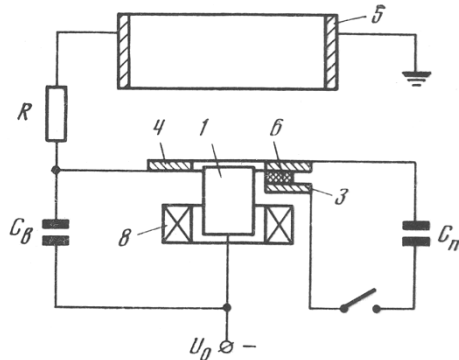


Рисунок 4 – Двухступенчатая система запуска источников плазмы: 1 – катод; 3 – поджигающий электрод; 4 – вспомогательный анод; 5 – анод; 6 – диэлектрическая вставка

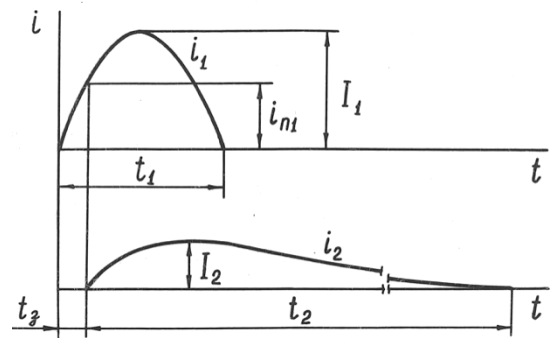


Рисунок 5 – Диаграммы токов в первой и второй ступенях запуска

Первая ступень – это пусковой инжектор (здесь он образован элементами 3, 6 и 4), который генерирует плазменный сгусток, инициирующий разряд во второй ступени – между катодом 1 и вспомогательным анодом 4. Представление о процессе зажигания дуги в двухступенчатой

системе поджига дает рис. 5, где показаны диаграммы токов в цепях разряда пускового инжектора  $i_1$  и вспомогательного анода  $i_2$ . Характерные значения величин на диаграмме:  $I_1 \sim 500$  А,  $I_2 \sim 150$  А,  $i_{n1} \sim 200$  А,  $t_1 \sim 60$  мкс,  $t_2 \sim 1$  мс,  $10$  мкс  $< t_3 < 50$  мкс. Необходимо отметить, что при  $i_{n1} < 150$  А возбуждения разряда во второй ступени не происходит из-за недостаточной плотности плазмы, генерируемой пусковым разрядом. При параметрах  $I_2 \sim 200$  А и  $t_2 \sim 1,5$  мс, которые легко регулируются значениями R и  $C_B$ , срабатывание второй ступени практически всегда приводит к зажиганию дуги. Таким образом, на первый план выходит надежность и долговечность первой ступени запуска – пускового инжектора.

С целью определения указанных характеристик были исследованы различные конструкции пусковых инжекторов, представленные на рис. 6, при заполнении их разрядного промежутка различными материалами.

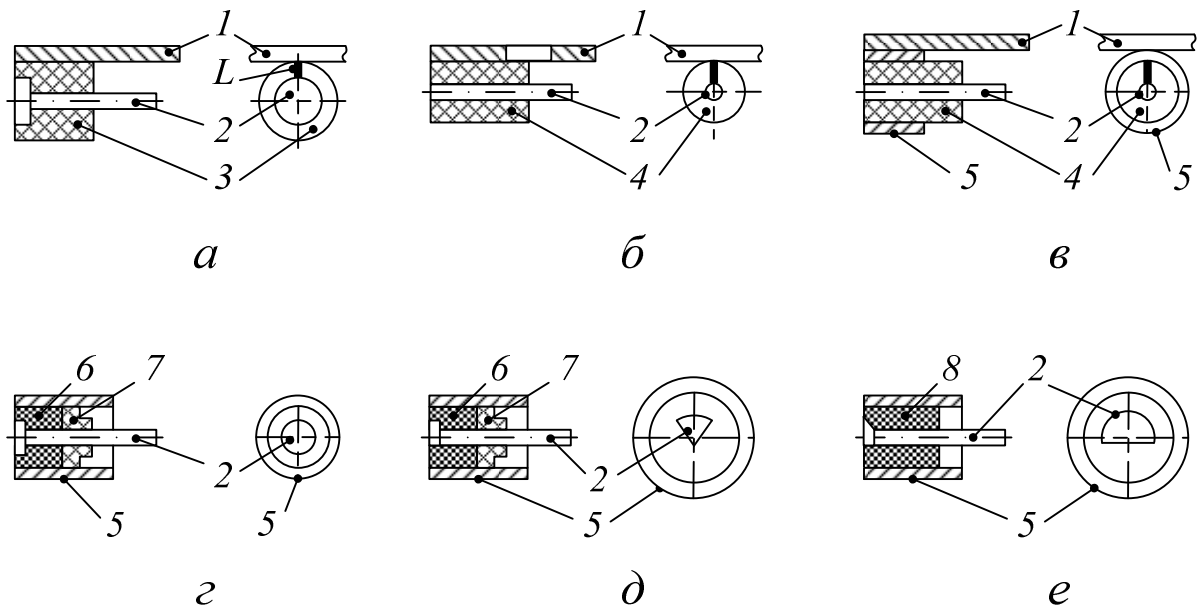


Рисунок 6 – Варианты конструкций пусковых инжекторов:

1 – вспомогательный анод; 2 – поджигающий электрод; 3 – керамика 22ХС;  
4 – керамика М-7; 5 – наружный электрод пускового инжектора; 6 – электропроводящий композиционный материал [8]; 7 – керамическое кольцо; 8 – композиционный материал [7]; L- слой аквадага

В ходе испытаний было выяснено, что применение керамик типа 22ХС и М-7 (рис. 6, а – в) для заполнения разрядного промежутка пусковых инжекторов, при приемлемой вероятности возбуждения дуги (рис. 7, источник плазмы с автостабилизацией КП, пусковые инжекторы – рис. 6, а, б), не позволяет обеспечить ресурс их работы более  $10^5$  срабатываний. Причиной этого является разрушение керамики, по всей вероятности, вызванное воздействием тепловых ударов, сопровождающих электрической пробой по ее поверхности, а также за счет воздействия КП основного разряда.

Более надежными в работе являются пусковые инжекторы, выполненные в виде коаксиальных «свеч» поджига, разрядный промежуток которых заполнен КМ (рис. 6, г – е). Иллюстрацией этого служит рис. 8, где даны пусковые характеристики источника плазмы с автостабилизацией КП, при использовании в нем инжектора с КМ конструкции рис.6, д. Такая же высокая вероятность запуска характерна для пусковых инжекторов с КМ конструкций рис. 6, д, е при использовании их в источниках плазмы с магнитным удержанием КП (рис. 9, 10).

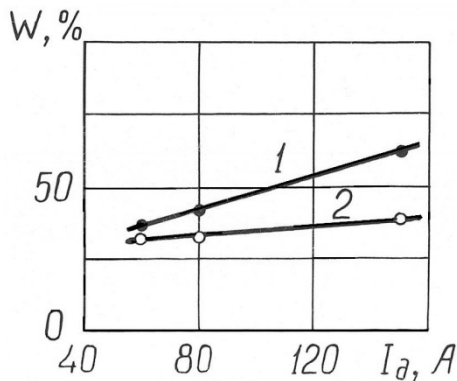


Рисунок 7 – Вероятность зажигания дуги в зависимости от ее тока.  $p = 1,3 \cdot 10^{-3}$  Па;  $H_{cm} = 0$ .  
1 –  $U_n = 400$  В; 2 –  $U_n = 250$  В

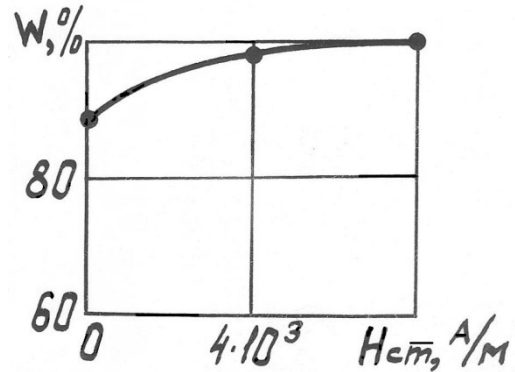


Рисунок 8 – Вероятность зажигания дуги в зависимости от магнитного поля  $H_{cm}$ .  
 $p = 1,3 \cdot 10^{-2}$  Па

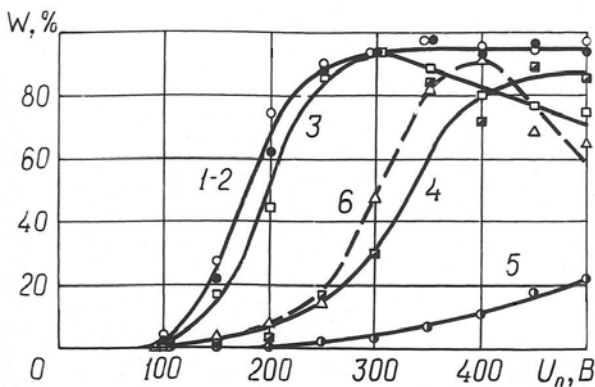


Рисунок 9 – Влияние энергии пускового импульса на пусковые характеристики.  $I_d = 320$  А;  $H_{cm} = 1,6 \cdot 10^{-4}$  А/м;  $H_{\phi} = 0,1$  –  $C_n = 120$  мкФ; 2 –  $C_n = 80$  мкФ; 3 –  $C_n = 40$  мкФ; 4 –  $C_n = 20$  мкФ; 5 –  $C_n = 10$  мкФ; 6 –  $C_n = 40$  мкФ, импульс поджига с высоковольтным всплеском в начале [1]

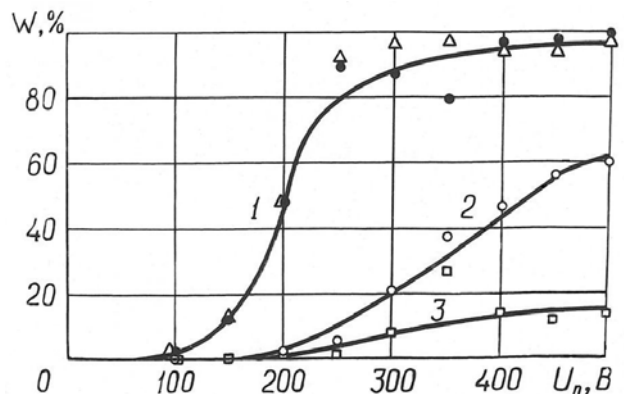


Рисунок 10 – Влияние количества срабатываний инжектора на стабильность поджига.  $I_d = 320$  А;  $H_{cm} = 1,6 \cdot 10^{-4}$  А/м;  $H_{\phi} = 0$ ;  
1 –  $N = 0$  ( $\Delta$ ) и  $N = 150\,000$  ( $\bullet$ );  
2 –  $N = 60\,000$ ; 3 –  $N = 150\,000$

Ресурс работы пусковых инжекторов с КМ при энергии пускового импульса 5 Дж превышает  $10^6$  срабатываний. При этом установлено снижение вероятности поджига в зависимости от количества актов возбуждения дуги (рис. 10). Исследования показали, что причиной этого



эффекта является образование достаточно толстой пленки из материала катода, снижающей эффективность запуска. Восстановить вероятность зажигания до первоначального уровня можно путем механического удаления пленки, что иллюстрирует кривая 1(•) на рис. 10. Детальное изучение процесса образования пленки позволило разработать способы подачи пусковых импульсов, заключающиеся в чередовании их полярности [12,13], при использовании которых образование пленки в пусковом разрядном промежутке не происходит.

Ряд исследований был направлен на уточнение модели процессов, происходящих в первой ступени СИ, представленной в [14]. Такая модель необходима для априорной оценки основных характеристик СИ и полезна при их конструкторской разработке. Упрощенное представление о влиянии на процессы запуска дуги места возникновения КП пускового разряда [1], геометрии разрядного промежутка и пускового инжектора, дает рис. 11. Из его анализа следует, в частности, что  $W = f(d, l, l_1)$ .

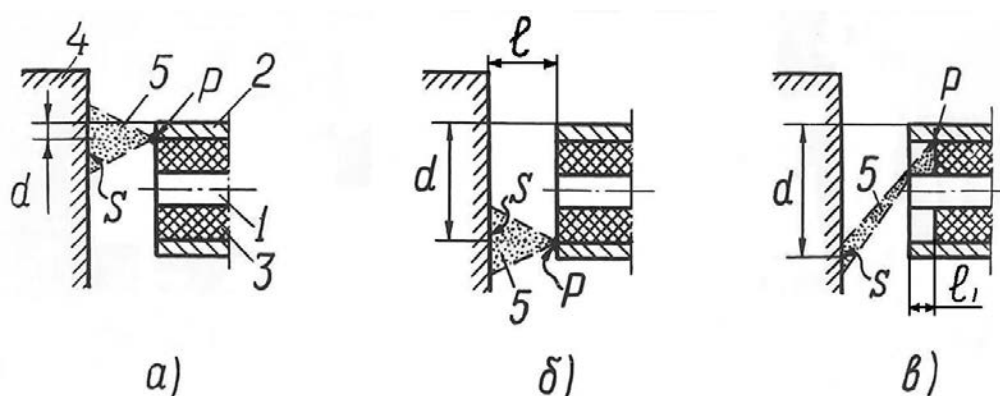
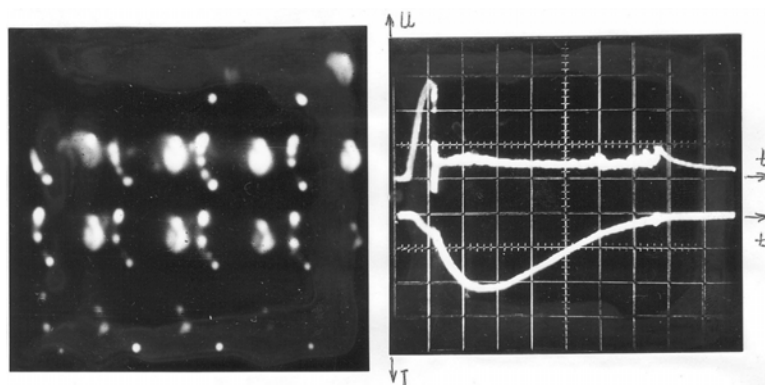


Рисунок 11 – Влияние места возникновения КП пускового разряда, геометрии разрядного промежутка и пускового инжектора на зажигание дуги:  
 1–внутренний, 2–наружный электрод пускового инжектора; 3–КМ; 4–рабочий торец катода; 5–плазменная струя;  $d$  – параметр удаленности;  $l$ –расстояние от инжектора до катода;  $p$ –место возникновения КП;  $s$ –зона контакта плазменной струи с катодом;  $l_1$  – расстояние от рабочего торца инжектора до поверхности КМ

Более уточненные знания о быстропротекающих процессах в разрядном промежутке пускового инжектора можно получить с помощью их скоростной регистрации с использованием прибора «ЛВ-04» с электронно-оптическим преобразователем. Такая регистрация позволяет на одном фотоснимке, условно называемом ЭОП-граммой, зафиксировать 16 кадров разряда с высоким временным разрешением. Типичная ЭОП-грамма с соответствующими осциллограммами напряжения и тока разряда показана на рис. 12.

Обработка ЭОП-грамм и синхронных с ними осциллограмм пускового разряда производилась по методике [15]. После коммутации  $C_n$  (20,0...80,0 мкФ), заряженного до напряжения  $U_n$  (200...500 В) через

сопротивление  $R$  (0...2 Ом), спустя некоторое время задержки в пусковом разрядном промежутке образуется дуговой разряд с амплитудой тока до 600 А. Этот разряд сопровождается появлением анодного пятна той или иной площади и нескольких КП. Ток, приходящийся на одно КП, в среднем составляет величину 50...60 А на фронте и 10...20 А на спаде импульса тока. Скорость перемещения КП достигает 200 м/с, что характерно для КП 1-го типа. Вместе с тем, иногда отмечаются и неподвижные КП, что, очевидно, связано с их фиксацией на границе металл - КМ. Плотность тока в КП лежит в диапазоне  $(0,5 - 5) \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup>, причем верхнее значение соответствует начальной стадии разряда. Значения вероятности запуска источника плазмы  $W$ , рассчитанные по методике [14] с использованием полученных данных, отличаются от экспериментальных не более чем на 20%.



*Рисунок 12 – Характерная ЭОП-грамма и осциллограммы напряжения и тока пускового разряда. Центральный электрод – анод, внутренний катод. Длительность кадра ЭОП-граммы 10 мкс без задержки. Масштабы на осциллограммах по осям времени, напряжения и тока - 20 мкс/дел, 100 В/дел и 40 А/дел соответственно*

Зажигание дуги в технологических источниках плазмы импульсным пусковым инжектором получило широкое распространение в серийных ионно-плазменных установках типа «Булат». В одной из последних модификаций («Булат-9») в качестве пусковых инжекторов применяются инжекторы с КМ.

#### **2.4. Возбуждение дуги с помощью тлеющего разряда**

Исследования по зажиганию вакуумно-дугового разряда путем перехода тлеющего разряда в дуговой выполнялись в следующих направлениях: ПТД в системе электродов пеннинговского типа и ПТД с использованием полого катода с диэлектрическими стимуляторами КП.

ПТД в системе электродов пеннинговского типа исследовался в экспериментальном устройстве, приведенном на рис. 13. В ходе экспериментов выполнялся поиск условий, при которых ПТД происходил в наиболее широком диапазоне давлений с возникновением КП на элек-

трое 4. Были изучены различные схемы подключения электродов. На рис. 14, а для оптимальной схемы включения электродов показан ПТД при различных напряжениях  $U_0$  в зависимости от давления азота, особенности ПТД отражает рис.14, б.

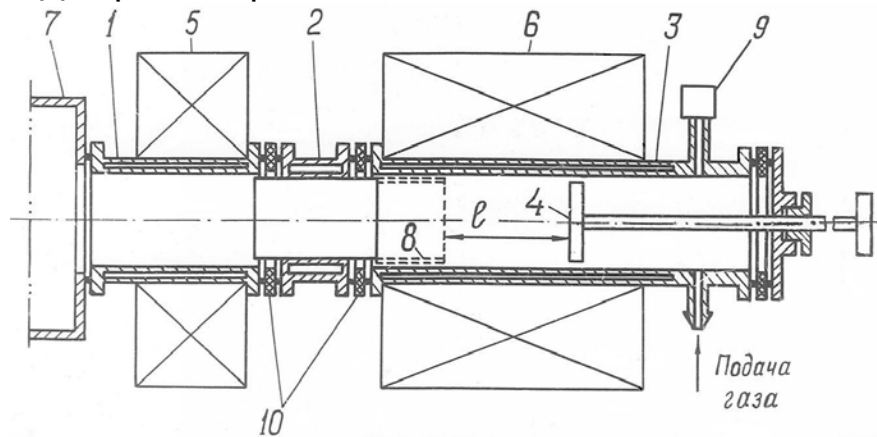
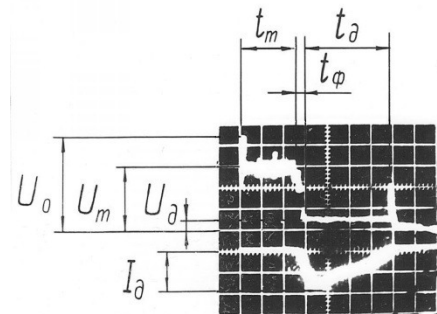
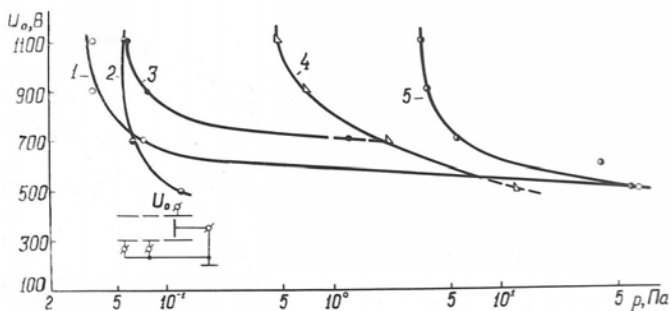


Рисунок 13 – Экспериментальное вакуумно-дуговое устройство: 1, 2, 3 – тручатые водоохлаждаемые электроды; 4 – перемещаемый электрод (катод); 5, 6 – соленоиды; 7 – вакуумная камера; 8 – сменная вставка; 9 – датчик давления; 10 – изоляторы



а

б

Рисунок 14 – Влияние давления азота и величины приложенного напряжения на ПТД (А) и его особенности (Б): 1,3 – согласное, 4 – встречное включение катушек. 1 –  $H_1 = 8 \cdot 10^4$  А/м,  $H_2 = 0$ ; 2 –  $H_1 = 2 \cdot 10^5$  А/м,  $H_2 = 4 \cdot 10^4$  А/м, 3 –  $H_1 = 0$ ,  $H_2 = 4 \cdot 10^4$  А/м; 4 –  $H_1 = 2 \cdot 10^5$  А/м,  $H_2 = 4 \cdot 10^4$  А/м; 5 –  $H_1 = H_2 = 0$ ; 1 – 4 ПТД между электродами 3 и 4; 5 – ПТД между электродами 3 и 2

Проведенные исследования позволили установить закономерности ПТД от различных условий – амплитуды пусковых импульсов, напряженности и конфигурации магнитных полей, давления газа, длины электрода 3. Они явились основой для создания опытного импульсного источника плазмы, представленного на рис. 15, а. Пусковые характеристики такого источника приведены на рис. 15, б. Использование данного источника плазмы целесообразно в технологических процессах, использующих реакционные газы, которые образуют на поверхности катода соединения с его материалом. Возникающие пленки являются активными центрами, где идет формирование КП. В противном случае через несколько сотен срабатываний вероятность ПТД падает до значений 10...50%, что

объясняется очисткой поверхности катода от различных неоднородностей.

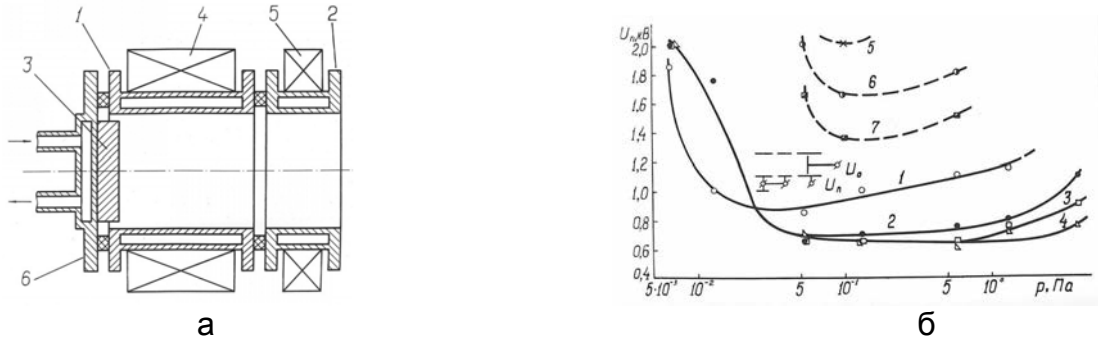


Рисунок 15 – Конструкция (а) и пусковые характеристики (б) импульсного источника плазмы. а: 1,2 – трубчатые электроды, 3 – катод; 4,5 – катушки; 6 – опорный фланец. б:  $U_0 = 120$  В,  $H_2 = 6 \cdot 10^4$  А/м, 2 – 4 согласно, 5 – 7 встречное включение соленоидов.  $H_1 = 1 - 0$ ; 2, 5 –  $4 \cdot 10^4$  А/м; 3, 6 –  $9,6 \cdot 10^4$  А/м; 4, 7 –  $2,4 \cdot 10^5$  А/м

Расширить технологические возможности удалось в источнике плазмы, где ПТД осуществляется в полукатодной системе с использованием диэлектрических стимуляторов КП. Экспериментальное устройство и опытный образец источника плазмы, в которых возбуждение дуги производится ПТД с диэлектрическими стимуляторами КП, и их пусковые характеристики представлены на рис.16 и 17 соответственно.

Для надежного зажигания дуги в рассмотренных вакуумно-дуговых устройствах, особенно при пониженных давлениях, необходимо применение достаточно сильных магнитных полей напряженностью до  $1,6 \cdot 10^5$  А/м и выше. При таких величинах магнитного поля наблюдается повышенное падение напряжения на дуговом разряде (рис. 18), что снижает стабильность горения дуги. В то же время для обеспечения оптимальной жесткости фиксации КП на рабочей поверхности катода и степени фокусировки плазменного потока требуется применение магнитных полей меньшей напряженности (порядка  $2 \cdot 10^4 \dots 8 \cdot 10^4$  А/м).

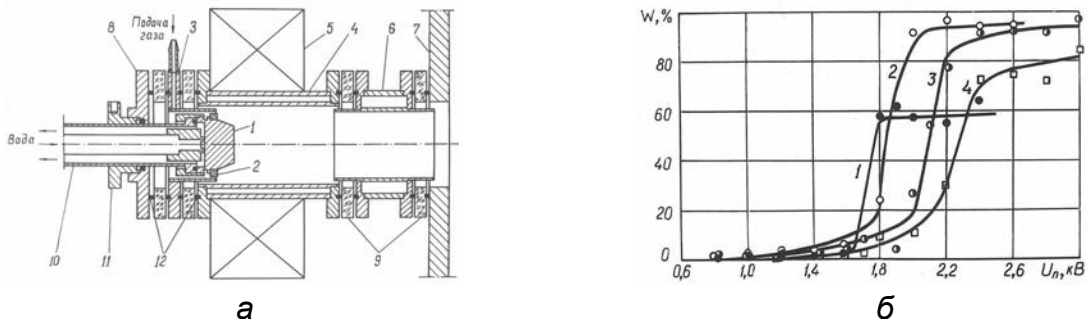


Рисунок 16 – Экспериментальное устройство с диэлектрическим стимулятором КП (а) и его пусковые характеристики (б). а – 1 – катод; 2 – диэлектрический стимулятор КП; 3 – экран с каналом подачи газа; 4 – анод; 5 – соленоид; 6 – пусковой электрод; 7 – вакуумная камера; 8 – держатель катода; 9 – оргстекло; 10 – вывод катода; 11 – гайка; 12 – уплотнители. б –  $p = 5,3 \cdot 10^{-2}$  Па,  $N_2$ ;  $H = 5,6 \cdot 10^4$  А/м;  $C_n = 1 - 10$  мкФ; 2 – 2 мкФ; 3 – 1 мкФ; 4 – 0,25 мкФ

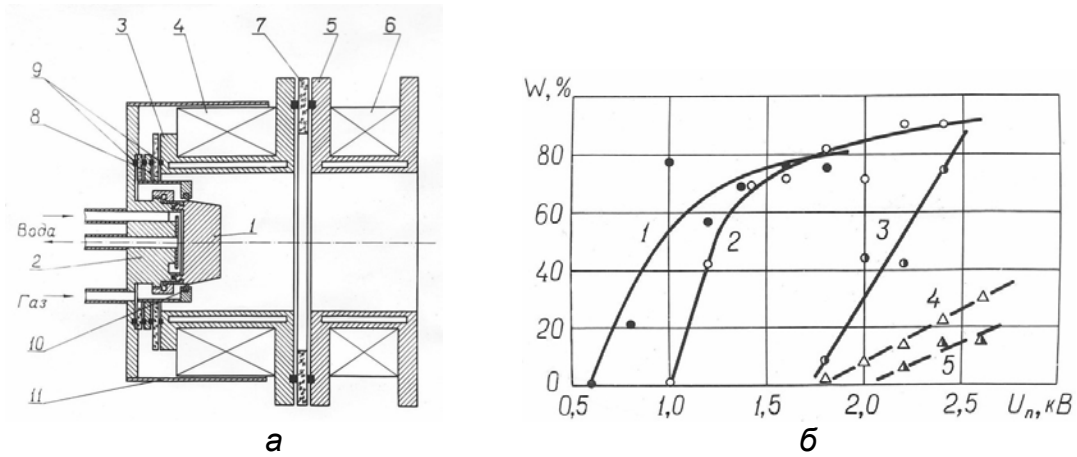


Рисунок 17 – Опытный источник плазмы с диэлектрическими стимуляторами КП (а) и его пусковые характеристики (б):

а: 1 – катод; 2 – держатель катода; 3 – анод; 4, 6 – катушки; 5 – пусковой электрод; 7 – изолятор; 8 – экран; 9 – уплотнители; 10 – керамика М-7; 11 – кожух.  
 б:  $H_{cm} = 1,6 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ ; 1, 2, 3 – встречное, 4, 5 – согласное включение катушек 4 и 6; 1, 4 –  $H_{\phi} = 8 \cdot 10^3 \text{ А/м}$ ; 2, 5 –  $H_{\phi} = 1,6 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ ; 3 –  $H_{\phi} = 6,4 \cdot 10^4 \text{ А/м}$

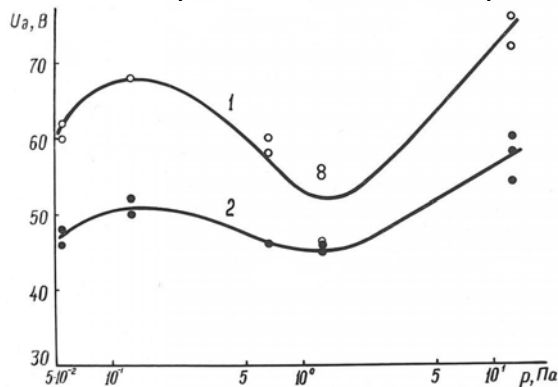


Рисунок 18 – Падение напряжения на дуге в зависимости от давления азота:  
 1 –  $H = 1,2 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ ; 2 –  $H = 6 \cdot 10^4 \text{ А/м}$

Обеспечить сочетание высокого магнитного поля при запуске и низкого в процессе дальнейшей работы можно при использовании способа зажигания дуги, описанного в [16]. В этом способе при зажигании вакуумно-дугового разряда формируют импульс магнитного поля, совпадающий по направлению с полем постоянной напряженности, а пусковой импульс на поджигающий электрод подают в момент максимальной напряженности магнитного поля. Процесс возбуждения вакуумной дуги с использованием импульса магнитного поля показан на рис. 19.

Создание при зажигании дуги импульса магнитного поля позволяет получить его значительное амплитудное значение. При этом подача пускового импульса именно в момент максимальной напряженности магнитного поля обеспечивает надежное зажигание сильноточного тлеющего разряда и его переход в дуговой даже при пониженных рабочих давлениях. Поскольку после процесса возбуждения вакуумно-

дугового разряда магнитное поле снижается до номинальной (небольшой) величины, определяемой конкретными требованиями, то на стадии горения дугового разряда отсутствует излишне жесткая стабилизация КП дуги, чем обеспечивается более высокий коэффициент использования плазмообразующего материала катода. Работа плазменного устройства после зажигания дуги при небольших величинах магнитных полей характеризуется стабильным горением дугового разряда во всем диапазоне рабочих давлений.

В заключение отметим, что совершенствование систем инициирования технологических источников плазмы, на наш взгляд, связано с дальнейшими исследованиями, направленными на поиск новых конструктивных решений узлов поджига и всего плазменного устройства в целом, усовершенствования на основе полученных знаний способов зажигания дуги за счет применения новых схемных решений, других типов электрических разрядов и материалов, используемых в системах поджига.

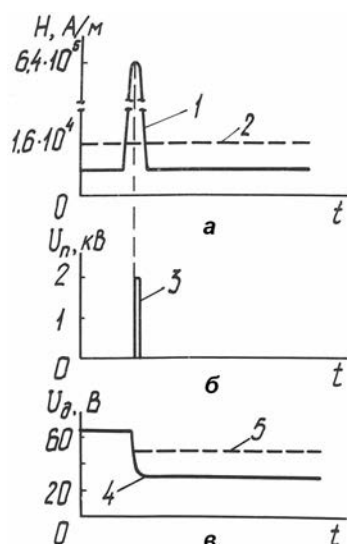


Рисунок 19 – Процесс возбуждения вакуумной дуги с использованием импульса магнитного поля: 1 – импульс магнитного поля; 2 – магнитное поле постоянной напряженности; 3 – пусковой импульс; 4, 5 – падение напряжения на дуге с импульсом и без импульса магнитного поля

## ВЫВОДЫ

1. С использованием предложенных критериев оценки надежности и долговечности систем инициирования вакуумно-дугового разряда в технологических источниках плазмы выполнены комплексные исследования систем возбуждения дуги контактного типа с искровым поверхностным пробоем, двухступенчатых систем запуска с автономным плазменным инжектором и систем поджига, основанных на переходе тлеющего разряда в дуговой.

2. На основе полученных данных разработаны конструкции вакуумно-дуговых источников плазмы с системами контактного типа, обеспечивающие их работоспособность в определенном диапазоне

технологических параметров. Предложена схема подключения узла поджига к источнику питания дуги, позволившая автоматизировать процесс запуска и отказаться от отдельного блока поджига.

3. Выявлена оптимальная геометрия разрядных промежутков в системах инициирования бесконтактного типа с применением автономных плазменных инжекторов. С помощью высокоскоростной регистрации динамики развития пускового разряда получен ряд данных о процессах на электродах импульсного плазменного инжектора, которые использованы в разработанной методике априорной оценки основных критериев систем инициирования при их проектировании. Предложен способ управления пусковыми импульсами, обеспечивающий высокую вероятность возбуждения дуги в течение всего срока службы пускового инжектора (более  $10^6$  актов зажигания дугового разряда).

4. Определено влияние основных параметров (давление и сорт рабочего газа, наличие диэлектрика, контактирующего с катодом, величины пускового импульса, напряженности и конфигурации магнитных полей) на эффективность перехода тлеющего разряда в дуговой в пенниговской и полокатодной системах. Предложен метод запуска с использованием импульса магнитного поля. Разработаны опытные образцы технологических источников плазмы с возбуждением вакуумно-дугового разряда путем ПТД.

5. Намечены пути дальнейшего повышения надежности и долговечности систем инициирования, связанные с поиском новых конструктивных решений как узлов поджига, так и всего плазменного устройства в целом, усовершенствованием способов зажигания дуги за счет применения новых схемных решений, других типов электрических разрядов и материалов,

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Аксенов И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И.И.Аксенов. – Х.: ННЦ ХФТИ, 2005. – 212 с.
2. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги / И.Г. Кесаев. – М.: Наука, 1968. – 244 с.
3. Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме / И.Н. Сливков. - М.: Энергоатомиздат, 1985. – 256 с.
4. Инициация вакуумной дуги / Вакуумные дуги: пер. с англ. // Дж. Кобайн, Г. Эккер, Дж. Фарелл и др.; под ред. Дж. Лафферти. – М.: Мир, 1982. – С. 108 – 152.
5. А.с. 550943 СССР, МКИ Н01 J 37/00. Способ зажигания вакуумной дуги / И.И. Аксенов, В.А. Белоус, В.Г. Падалка, А.А. Романов (СССР). – Заявл. 18.08.75. – Опубл. 1978. – Бюл. ОИПОТЗ № 31.
6. Аксенов И.И. Зажигание вакуумной дуги в стационарных источниках металлической плазмы от автономного плазменного

инжектора / И.И. Аксенов, В.А. Белоус // ПТЭ. – 1979. – №3. – С. 160 – 162.

7. Сысоев Ю.А. Высокоресурсные пусковые инжекторы для источников плазмы электротехнологических установок / Ю.А. Сысоев // Новые электротехнологические процессы в машиностроении : тез. докл. Всесоюз. семин. – Кишинев: Кишинев. политехн. ин-т, 1990. – С. 99 – 100.

8. А.с. 1125941 СССР, МКИ С04 В35/00. Электропроводящий композиционный материал / В.Г. Сердюк, С.А. Смирнов, В.А. Белоус, В.Ф. Полохов (СССР). – Заявл. 13.07.83. – Оpubл. 1987. – Бюл. ОИПОТЗ. №24.

9. Костюк Г.И. Исследование ресурсных характеристик пусковых инжекторов систем инициирования плазменных устройств / Г.И. Костюк, Ю.А. Сысоев // Новые технологии и робототехнические комплексы в производстве авиационной техники: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 1989. – С 27 – 36.

10. А.с. 1598836 СССР, МКИ Н 05 В 7/18. Вакуумно-дуговая плазменная установка / Ю.А. Сысоев, Г.И. Костюк, А.В. Козаченко (СССР). – 24.05.88.

11. А.с. 1558284 СССР, МКИ Н 05 В 7/22. Вакуумно-дуговое плазменное устройство / Ю.А. Сысоев, Г.И. Костюк, И.И. Аксенов (СССР). – 19.04.88.

12. А.с. 1552917 СССР, МКИ Н 01 J 17/12. Способ управления поджигающим устройством вакуумного дугового разряда / Ю.А. Сысоев, Ф.Л. Ерихов, В.Г. Сердюк, В.И. Шелохаев (СССР). – 23.06.87.

13. А.с. 1792206 СССР, МКИ Н 01 Т 1/20. Способ инициирования вакуумно-дугового разряда в источниках плазмы и управляемых разрядниках / Ю.А. Сысоев. (СССР). – 11.11.90.

14. Сысоев Ю.А. Вероятность процесса зажигания разряда в вакуумно-дуговом плазменном устройстве / Ю.А. Сысоев, М.В. Гончаренко // Новые технологии и робототехнические комплексы в производстве авиационной техники: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 1989. – С 41 – 49.

15. Костюк Г.И. Методика обработки ЭОП-грамм и осциллограмм импульсного разряда в плазменном инжекторе / Г.И. Костюк, Ю.А. Сысоев // VII Всесоюз. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам : тез. докл. VII Всесоюзн. конф. 26-28 сентября 1989 г., Х.: ЦНИИАтоминформ, 1989. – С. 231 – 232.

16. А.с. 1517745 СССР, МКИ Н 05 Н 1/26. Способ зажигания дуги в вакуумной установке / Ю.А. Сысоев, Г.И. Костюк (СССР). – 28.10.87.