

На правах рукописи



Орликов Николай Леонидович

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА  
ДЛИННОМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ**

Специальность: 05.09.02 –Электротехнические материалы и изделия

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск-2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (НИ ТПУ) и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

**Научные руководители:** Гынгазов Сергей Анатольевич, доктор технических наук

Носков Дмитрий Александрович, доктор технических наук, профессор.

**Официальные оппоненты:**

Коновалов Сергей Валерьевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет», кафедра физики имени профессора В.М. Финкеля, профессор (г. Новокузнецк)

Смирнягина Наталья Назаровна, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской Академии Наук», главный научный сотрудник (г. Улан-Удэ)

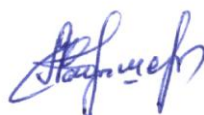
**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Защита состоится «02» марта 2016 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.269.10 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru:/council/2800/worklist>

Автореферат разослан «13» января 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.269.10, д.т.н., с.н.с.



Кабышев А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время длинномерные проволочные и рулонные электротехнические материалы широко применяются в технике. Расширение сферы применения электротехнических материалов поставило задачу определения глубины локализации газов, распределенных в металле вследствие отклонений технологии металлургии или протяжки металла через фильеры. В ряде случаев возникает необходимость удаления локализованных газов (особенно кислорода) из объема длинномерных проволочных материалов (стальной проволоки для электродов, вольфрама для тел накала, молибдена для арматуры электровакуумных приборов). Существующие технологии химической и термической обработки при атмосферном давлении не удовлетворяют требованиям по энергоемкости, производительности, качеству и себестоимости процессов обработки длинномерных электротехнических материалов.

Один из способов решения проблемы – электрофизическая обработка электротехнических материалов в плазме, реализуемая при пониженном давлении и непрерывном вводе проволочных материалов из атмосферы в генератор газоразрядной плазмы.

Однако проблема электрофизической обработки длинномерных электротехнических материалов с вводом в вакуум недостаточно изучена. Решение проблемы обработки длинномерных электротехнических материалов распадается на несколько задач. Необходимо исследовать физико-химические процессы выделения газа из длинномерного электротехнического материала; исследовать закономерности формирования защитных покрытий и пленок в условиях изменения температуры, давления и ограничения расстояния; исследовать условия снижения необходимой мощности откачных средств, для обеспечения вакуума; установить закономерности согласования режимов при конструировании систем для обработки длинномерных электротехнических материалов. Поэтому тема исследования процессов электрофизической обработки электротехнических материалов является **актуальной**.

**Цель диссертационной работы** заключается в исследовании явлений, сопровождающих электрофизическую обработку длинномерных электротехнических материалов, а также в разработке простых устройств для очистки,

обезгаживания, отжига и формирования покрытий на электротехнических материалах.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- 1) исследование механизма выделения газов из металлов (глубины залегания). Определение глубины залегания газов минимизирует энергетические затраты на последующие технологические операции;
- 2) исследование особенностей формирования пленок в условиях натекания газа в условиях ограниченного пространства;
- 3) исследование условий минимизации мощности откачки для обеспечения вакуума при вводе электротехнических материалов из атмосферы;
- 4) разработка рекомендаций по расчету и конструированию систем для обработки длинномерных из электротехнических материалов.

**Основная идея** заключается в исследовании возможности реализации очистки, отжига и формирования защитного покрытия в процессе поточного ввода и вывода материала через отверстия в вакуумной камере. Необходимые энергетические затраты на обработку определяются из анализа глубины залегания газов в материале. Уменьшение энергетических затрат на обеспечение вакуума достигается с помощью газодинамических эффектов.

**Научная новизна:**

1. Выявлены закономерности связи глубины залегания газов, скорости роста температуры и механизма газовыделения и проведены комплексные исследования по влиянию скорости роста температуры на приоритетность механизма десорбции газов.
2. Впервые выявлены закономерности смещения диаграммы фазных состояний при формировании пленок при напуске газа.
3. Предложены модели, объясняющие эволюцию формы потока пара металла при формировании покрытий.
4. Впервые сформулированы закономерности геометрического и параметрического управления формированием пленок в ограниченном пространстве.
5. Впервые показаны пути снижения потребляемой мощности на обработку проволочных материалов в вакууме за счет отклонения газа срезом элементов или локальным разрядом.

6. Выявлено влияние электронного пучка и тлеющего разряда на конденсацию пара на подложке.

### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Механизм термодесорбции газов из металлов носит приоритетный характер в зависимости от скорости роста температуры. Если большей скорости нагрева соответствует меньший поток газовой выделения, то газ расположен в приповерхностных и глубинных слоях. Выяснение механизма газовой выделения позволяет минимизировать энергетические затраты на обезгаживание изделий.

2. Испарение материала в вакууме происходит с изменением формы и температуры паров. Это позволяет сократить расстояние от испарителя до подложки и осуществлять геометрические и параметрические способы управления распределением толщины пленки по подложке.

3. При напуске газов в область парового потока имеет место смещение диаграммы фазных состояний и изобарного потенциала пропорционально квадрату локального значения функции температуры.

4. С уменьшением давления приоритет в создании перепада давления переходит от систем с усложнением формы элементов к системам на основе локального газового разряда.

5. При воздействии электронного или плазменного потока на поток пара происходит частичное экранирование потока пара. Это позволяет обеспечивать функциональное изменение закона напыления

### **Практическая значимость работы**

1. Разработаны устройства: для поточной ионной очистки и отжига проволочных электротехнических материалов; для непрерывного алюминирования рулонного фторопласта для конденсаторов; для утилизации отходов фторопласта в порошок.

2. Установлены закономерности протекания процессов обработки материалов, в режиме обмена газа при изменении геометрических размеров оборудования, давления или температуры.

**Реализация работы.** Результаты работы используются на Томском электроламповом заводе, в ФГУП НИИПП, в ИФПМ СОРАН, в ТУСУРе.

**Личный вклад автора** заключается в непосредственном участии в планировании и выполнении всех работ, проводимых в рамках диссертационной

работы. Лично автором проведена следующая работа:

- разработана и сконструирована установка для очистки, отжига и формирования защитного покрытия в одном технологическом цикле;
- проведены исследования условий формирования покрытий в ограниченном пространстве в условиях обмена газа;
- предложены конструкции, позволяющие сократить энергетические затраты на ввод и вывод материалов на порядок относительно мировых достижений;
- проведен анализ получаемых результатов и сформулированы основные выводы, решены задачи, возникшие по ходу выполнения диссертационной работы.

Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые научные положения. С непосредственным участием автора подготавливались научные статьи и выступления на конференциях.

**Апробация работы.** Основные материалы изложенные в диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях: 4 - 7-я международные конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-98, АПЭП 2000, АПЭП 2002). – Новосибирск, 1998 г., 2000 г., 2002 г.; «Конверсия науки – международному сотрудничеству». - Томск, 1999 г.; «Высоковольтная микроволновая электроника»: MIA-ME'99. - Новосибирск, 1999 г.; «Измерения и контроль» (ИКИ-2000). - Барнаул, 2000 г.; «Интеллектуальные и природные ресурсы Сибири». – Барнаул, 2001 г.; «Радиационная физика и химия РФХ-12». - Томск, 2003 г.; «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии». - Кисловодск, 2008 г.; «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах». – Томск, 2008 г, 2014 г; «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». - СПб, 2010 г.; «Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических цепях». - Пенза, ПДЗ, 2010 г.; «Материалы и технологии XXI века». - Пенза, ПДЗ, 2004 г, 2015 г.

**Публикации.** По теме диссертационной работы было опубликовано 12 статей в журналах, рекомендованных ВАК; в 46 трудах и материалах международных конференций, 3 сборниках научных трудов, в 5-ти докладах на всероссийских конференциях, 11 тезисах на региональных и международных

конференциях, в 5 патентах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы. Объем диссертации – 139 страниц, включая 49 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель и поставлены соответствующие задачи, сформулирована научная новизна и практическая значимость диссертационной работы. Также приведены сведения о личном вкладе автора, апробации результатов диссертационной работы.

**В первой главе** проведен обзор методов определения механизма выделения газов из анализа кривых газовой выделенности, анализа коэффициентов диффузии и десорбционных кривых, показана их неточность. Описан экспериментальный комплекс для исследования механизма выделения газов на базе типовой вакуумной установки УВН-2М с измерителем парциальных давлений ИПДО-1. Для повышения чувствительности аппаратуры к кислородной компоненте предложено согласование потоков газовой выделенности и потока откачки с учетом проводимостей коммуникаций. На рисунке 1а представлены осциллограммы изменения температуры и потока кислорода при различных скоростях нагрева проволоки и условная схема перераспределения коэффициентов диффузии газов (рис.1б).

В итоге предложен способ определения механизма газовой выделенности, (патент 2223481), заключающийся в том, что если большей скорости нагрева соответствует меньшее количество газа, то газ расположен в приповерхностных слоях.

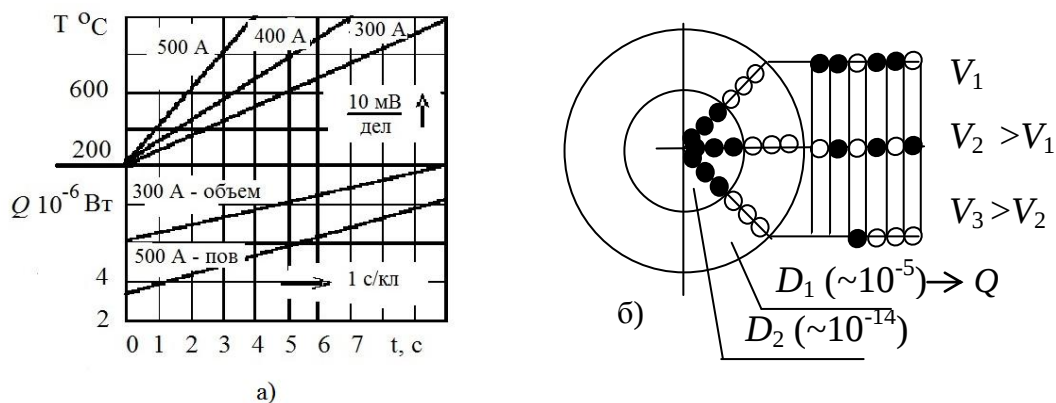


Рисунок 1. а) осциллограммы изменения температуры и потока кислорода;  
б) условная схема перераспределения коэффициентов диффузии газов

Рассмотренные в главе 1 особенности выделения газов из длинномерных электротехнических материалов использованы для формирования защитных цинковых покрытий непосредственно во время обработки длинномерного материала при давлениях 1-10 Па, поскольку традиционные электрофизические методы формирования покрытий реализуются при давлениях около 0,01 Па и требуют громоздкого высоковакуумного оборудования. Предпосылкой реализации метода формирования покрытий в условиях протяжки материала через газоразрядную плазму являются предварительные эксперименты автора, заключающиеся в формировании покрытий из цинка, свинца, алюминия при давлении 2-5 Па, когда давление пара металла превышает давление окружающей среды. Решению этих задач посвящена глава 2.

**Во второй главе** проведено исследование формирования пленок при обработке длинномерных электротехнических материалов. На рисунке 2 приведена форма потока пара легкоплавких материалов (цинк, свинец) по данным визуализации потока в тлеющем разряде.

Из результатов визуализации следует, что поток пара имеет волновую форму от шара до факела, с зонами уплотнения давления, положение которых зависит от отношения давления испарения к давлению в вакуумной камере  $P_j/P_1$ .

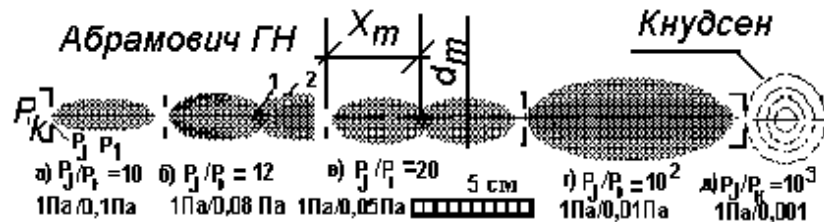


Рисунок 2 – Форма потока пара при визуализации в тлеющем разряде

Для объяснения результатов привлекалась как классическая теория Ленгмюра, так и теория динамики газовых потоков. Расстояние  $X_m$  до поперечной зоны уплотнения давления описывается выражением [1]:

$$X_m = (0,7 - 1,34)d(kP_j/P_1)^{0,5}, \quad (1)$$

где  $d$  – характерный размер отверстия истечения;  $k$  – показатель адиабаты (для пара  $k=1,3$ , для воздуха  $k=1,4$ );  $P_j$ ,  $P_1$  – давление испарения и давление в вакуумной камере. (В первом приближении давление испарения равно 1 Паскаль).

Максимальный поперечный размер потока описывается выражением [1]:

$$d_m = d(kP_j / P_1)^{0,5} \quad (2)$$

На рисунке 3 представлена схема, объясняющая изменение локальной толщины пленки титана по данным лазерных измерений.

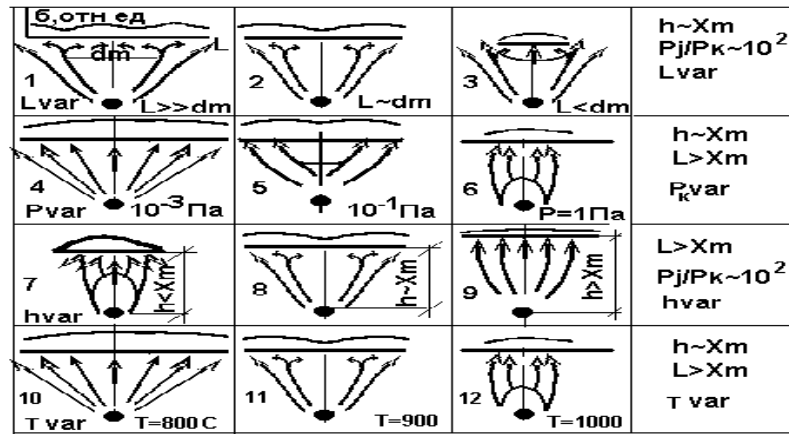


Рисунок 3 – Схема истечения и взаимодействия потока пара с подложкой

При уменьшении размеров подложки  $L$  формирование толщины пленки соответствует модели обтекания бесконечной плоской преграды (поз. 1, 2, 3). С приближением давления в камере к давлению испарения (4, 5, 6) форма истечения потока переходит от сферической к факельной. По мере увеличения расстояния (7, 8, 9) форма потока пара переходит от режима сильного отражения к режиму свободного истечения.

Изменение общей температуры испарения (10, 11, 12) эквивалентно изменению отношения давления испарения к давлению в вакуумной камере ( $P_j/P_k$ ). При изменении локальной температуры на срезе тигля (*параметрическое воздействие*) возникает термобароэффект, при котором разность температур вызывает разность давлений и отклонение потока пара. *Геометрическое управление* потоком достигается локальным срезом угла тигля. Локальный угол среза тигля  $\varphi$  вычисляется из условия предельно возможного поворота потока при истечении потока пара в абсолютный вакуум [1]:

$$\varphi = \pi - \pi / 2[(k + 1)/(k - 1)]^{0,5} \quad (3)$$

В пределе угол поворота потока составляет  $130^\circ 40'$ , а угол среза тигля, как дополнительный, не превышает  $49^\circ$ .

Качественное представление об изменении состава пленки дает диаграмма изобарного потенциала  $\Delta Z$ , (рис. 4):

$$\Delta Z = -RT \ln P_i, \quad (4)$$

где  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $T$  и  $P_i$  - соответственно температура и парциальное давление паров.

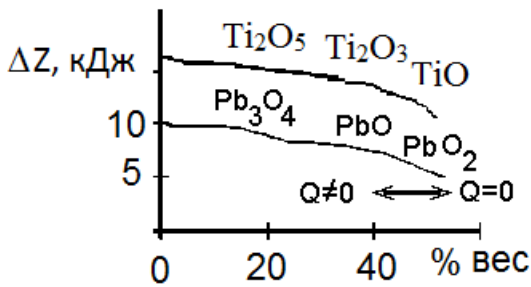


Рисунок 4 – Тенденция смещения диаграммы изобарного потенциала при изменении расхода напускаемого газа

В таблице 1 приведены параметры потока газа и пара [1].

Таблица 1 – Параметры потока газа и пара

|                 |   |     |      |      |      |      |       |       |
|-----------------|---|-----|------|------|------|------|-------|-------|
| $P_j/P_k$       | 1 | 1,1 | 1,89 | 7,69 | 37,0 | 200  | 300   | 555   |
| $\tau(\lambda)$ | 1 | 0,9 | 0,83 | 0,56 | 0,39 | 0,22 | 0,20  | 0,17  |
| $\pi(\lambda)$  | 1 | 0,9 | 0,83 | 0,50 | 0,30 | 0,20 | 0,18  | 0,16  |
| $d_m/d$         | 1 | 1,0 | 1,00 | 3,00 | 5,00 | 10,0 | 11,00 | 11,50 |
| $\lambda$       | 0 | 0,5 | 1,00 | 1,62 | 1,90 | 2,15 | 2,10  | 2,23  |

где  $\lambda$ - коэффициент скорости потока,  $\tau(\lambda)$ - функция изменения температуры;  $\pi(\lambda)$ - функция изменения давления;  $\pi(\lambda) = \tau(\lambda)^{k(k-1)}$

При неподвижном потоке коэффициент скорости потока  $\lambda \rightarrow 0$   $\tau^2 = 1$  изобарный потенциал  $\Delta Z$ -не изменяется. При звуковой направленной скорости потока  $\lambda \rightarrow 1$ ,  $\tau^2 = 0,64$ ,  $\Delta Z = 0,64$ ; при  $\lambda \rightarrow 2,5$ ,  $\tau^2 \rightarrow 0$ ,  $\Delta Z \rightarrow 0$ , то есть в движущемся потоке реакции паров с остаточным газом уменьшаются. Функция температуры  $\tau(\lambda)$  примерно равна функции давления  $\pi(\lambda)$ , поэтому изобарный потенциал запишется:

$$\Delta Z = -R\tau(\lambda) \times \tau(\lambda)^{k(k-1)} \approx -R\tau^2(\lambda) \quad (5)$$

То есть изменение (уменьшение) изобарного потенциала пропорционально квадрату функции изменения температуры.

При испарении легкоплавких электротехнических материалов (цинк, свинец, висмут) пар охлаждается и формируется в конгломераты с прерывистой функцией конденсации в виде «кучево-дождевых облаков». Прогрев пара, организация тлеющего разряда у подложки или пересечение потока пара пучком электронов способствуют формированию сплошной мелкой фракции и ведут к частичному экранированию конденсации пара на подложке.

Установленные в главе 2 закономерности о форме и размерах потока

испаренного материала открывают возможность формирования защитных покрытий на прутковых или проволочных материалах в ограниченном пространстве (например, внутри труб). Геометрическое, параметрическое и электронно-лучевое управление потоком пара при формировании покрытий является новым и оригинальным.

Новым является обнаружение смещения диаграммы фазных состояний при формировании покрытий в системах с обменом газа. Комплексная электрофизическая обработка длинномерных материалов в одном технологическом цикле (удаление газов, очистка, отжиг, формирование защитного покрытия) ставит проблему уменьшения потребляемой мощности на обеспечение перепада давления между атмосферой и областью газоразрядной плазмы. Известные решения требуют мощность вакуумных насосов 5-10 кВт на  $1 \text{ мм}^2$  площади отверстия.

**Глава 3** посвящена исследованию закономерностей уменьшения необходимой мощности вакуумных насосов, требуемой при вводе длинномерных электротехнических материалов из атмосферы в вакуум и выводе из вакуума в атмосферу (рис. 5).

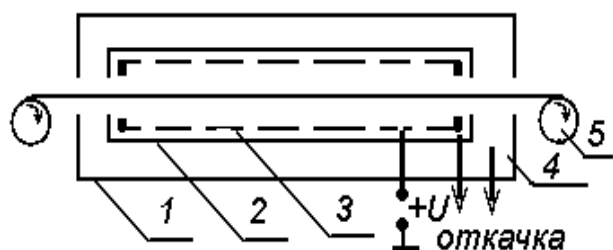


Рисунок 5 – Схема устройства для обработки проволочных материалов. 1,2 – цилиндры, 3 – сетка, 4 – камера промежуточной откачки, 5 – приемный барабан

Визуализация потока газа в тлеющем разряде показала, что картина истечения потока газа и потока пара металла подобна. Для паров металла картину визуализации см. на рисунке 2. В ходе экспериментов установлено, что расход откачиваемого газа между выводными элементами в диапазоне изменения  $h$  от 0 до  $X_m$  подчиняется выражению:

$$Q = P S h / X_m, \quad (6)$$

где  $X_m = 0,7d \sqrt{kP_j / P_1}$ ;

$P_j$  - давление газа на срезе отверстия истечения (для воздуха  $P_j = 0,528 P_k$ ).

На рис 6 представлена обобщенная зависимость оптимального расстояния от перепада давления на первой ступени откачки.

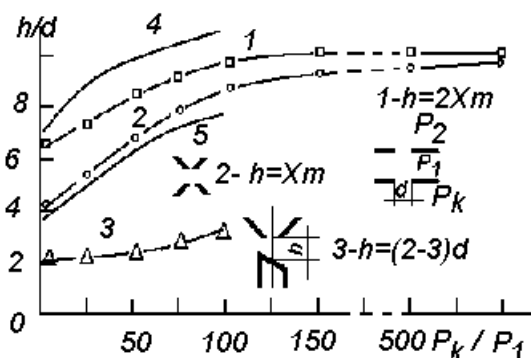


Рисунок 6 – Зависимость оптимального расстояния между элементами от перепада давления на первой ступени откачки. 1, 2, 3- эксперимент; 4, 5 – расчет для плоских и острых выводных элементов

Если элемент срезан под углом (кривая 3), то расширение газа начинается сначала в том месте, где поток скорее достигает вакуума. В нижней точке среза давление газа уменьшается быстрее, чем в верхней точке среза. Таким образом, на поток газа накладывается поперечный градиент давления, и газ отклоняется в сторону среза. В итоге элемент второй ступени оказывается в статическом давлении, и влияние формы на перепад давления не проявляется. Усиление отклонения потока газа достигается локальным разрядом на срезе элементов.

Основным механизмом удаления газа при разряде можно считать термобароэффект, при котором разность температур вызывает разность давлений.

В итоге можно сформулировать, что уменьшением давления приоритет в создании перепада давления переходит от систем с усложнением формы к системам на основе газового разряда. Это позволяет уменьшить необходимую мощность откачных средств от 10 до 0,5 кВт на мм<sup>2</sup> площади выводного отверстия.

**В четвертой главе** рассмотрены рекомендации по расчету и согласованию устройств для обработки длинномерных электротехнических материалов.

Расчет необходимой вводимой мощности проводится по оценке баланса необходимой для нагрева теплоты  $Q$ , и теплоты  $Q_э$ , необходимой для нагрева электрическим током.

$$Q = Cm\Delta T, \quad (7)$$

$$Q_э = UI\Delta t; \quad (8)$$

где  $T$  - температура,  $\Delta t$  - время нахождения в устройстве;  $C$ - удельная теплоемкость. Для стали  $C=0,15$  кал /гр. град.

Приемлемый компромисс устанавливается на уровне 15- 30 кВт/час.

Расчет необходимых откачных средств проводится по соотношениям

вакуумной техники. Для инженерных расчетов рекомендованы экспериментальные зависимости оптимального расстояния между элементами, при котором перепад давления максимален (см. рис. 6).

Далее в главе 4 рассмотрены конструкции устройств для обработки электротехнических материалов.

### **Устройство для ионной очистки и отжига вольфрамовых проволок**

На рисунке 7 представлена схема устройства для ионной очистки и отжига вольфрамовых проволок, как альтернатива очистки в щелочах.

Для согласования вольтамперных характеристик и рабочего давления меняются геометрические размеры разрядной камеры. Одним из путей снижения рабочего тока и сохранения высокого напряжения является напуск легких газов непосредственно в плазменную камеру. Мощность разряда тратится на формирование плазмы, на свечение, тепловые процессы, СВЧ колебания. Мощность, теряемая разрядом на генерацию СВЧ колебаний, достигает 25 %.

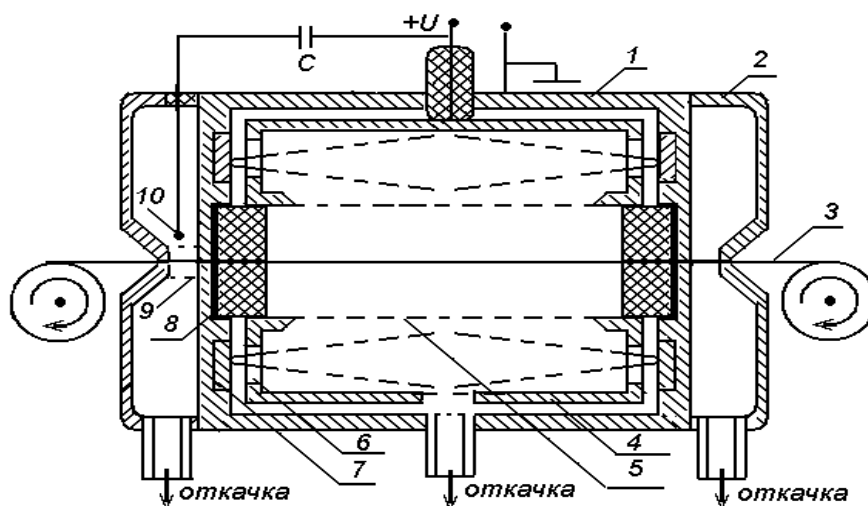


Рисунок 7 – Схема устройства для ионной очистки и отжига вольфрамовых проволок. 1 – корпус; 2 – камера промежуточной откачки; 3 – проволока; 4, 5 – цилиндры; 6 – анод; 7 – катод; 8 – держатели, 9 – сетка, 10 – электрод

Через введенную гальваническую развязку (конденсатор, петлю связи, трансформатор или дроссель) СВЧ напряжение передается на возбуждение разряда между элементами, что восстанавливает параметры при пробое и повышает стабильность работы системы.

### Устройство с камерой ионной очистки и камерой плазменного нагревателя

На рисунке 8 представлена принципиальная схема устройства для приоритетной электронной или ионной обработки стальных проволок.

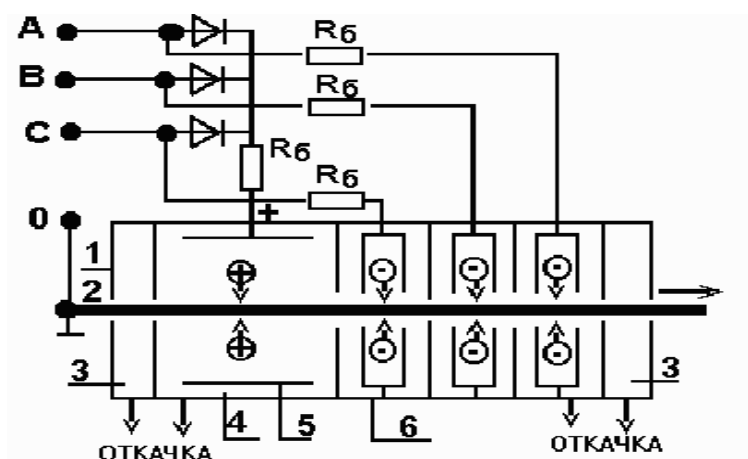


Рисунок 8 – Схема устройства для приоритетной электронной или ионной обработки стальных проволок. 1– корпус, 2– проволока, 3 – камера промежуточной откачки, 4 – генератор плазмы, 5 – анод, 6 – нагреватели

Технически конструкция выполнена из открывающихся половин типа “ракушки”. Все устройство питается от промышленной сети 380 В. В цепь генератора плазмы включены 3 диода типа Д-250. При откачке промежуточных камер 3 и корпуса 1 двумя насосами НВПР-16 в блоке нагревателей и генераторе плазмы 4 устанавливается давление соответственно 100 и 10 Па.

В блоке нагревателей зажигается ограниченный балластными сопротивлениями  $R_6$  диффузный дуговой разряд током до 5 А на каждый нагреватель. В генераторе плазмы зажигается тлеющий разряд током 0,1-2 А. Ионы из плазмы разряда бомбардируют поверхность расположенной на оси устройства проволоки, способствуя ее поверхностной очистке. Затем проволока поступает в блок нагревателей 3, где производится ее нагрев до температуры  $\sim 700^{\circ}\text{C}$ . Проволока движется со скоростью 1-10 см/с.

### Устройство для поточного отжига электродной проволоки между разнесенными плазменными контактами

На рисунке 9 представлена принципиальная схема устройства для очистки от графитовой смазки и отжига электродных молибденовых проволок диаметром 0,7 мм. Устройство состоит из двух разнесенных в пространстве камер, между которыми предусмотрено пространство для окислительного или

восстановительного отжига.

Плазменный контакт на проволоку обеспечивается напряжением ( $U_1=90$  В, 150 А). Отжиг проволок проводится электрическим током ( $U_2=16$  В, 500 А), пропускаемым между устройствами. Запуск дуги проводится поджигающим импульсом ( $U_3=18$  кВ, 50 мкА). Подача газа в устройство и его откачка водокольцевым насосом ВВН-3 до давления 20 кПа позволяют реализовать режим плазменного сильноточного контакта большой площади.

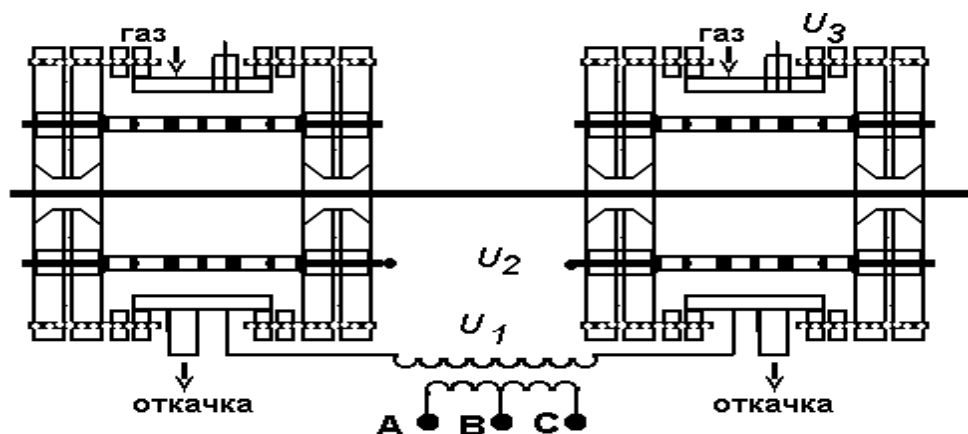


Рисунок 9 – Схема устройства для обработки электродной проволоки

Уплотнение элементов и электрическая изоляция выполнены из асбеста. Запуск дуги проводится поджигающим импульсом ( $U_3=18$  кВ, 50 мкА). Скорость протяжки составляет 0,1-1 м/с при температуре проволоки  $500^{\circ}$  С. Общая мощность установки составляет 10 кВт. Достоинства конструкции в том, что система откачивается одним водокольцевым насосом и отпадает необходимость в электролитических ваннах и газовых горелках.

### Устройства для алюминирования

В ряде применений возникает необходимость нанесения алюминиевых пленок на рулонные материалы с целью формирования конденсаторов. Литературный обзор предлагает формирование пленок в глубоком вакууме. Однако манипуляции с заправкой испарителей в глубоком вакууме сопровождаются колебаниями натекания газа через манипуляторы, что приводит к посредственным характеристикам пленок, в частности к локальному почернению по истечению некоторого времени.

На рисунке 10а представлена схема устройства для формирования алюминиевой пленки на рулонном фторопласте в условиях форвакуума. При обеспечении в камере давления инертного газа (гелия) 10- 80 Па и подаче на

холодный катод отрицательного потенциала (15 кВ) в системе возбуждается высоковольтный тлеющий разряд. Ионы из плазмы разряда устремляются на катод, из которого под действием ионно-электронной эмиссии выбивают электроны. Электронный пучок током до 15 мА направляется на шайбу из алюминия и испаряет ее. Расчетное давление паров алюминия составило 2 мм рт ст. Преобладание скорости молекул выше тепловой позволяет обеспечивать хорошую адгезию, оцениваемую по истиранию резиной. Особенностью является диффузное рассеяние паров на газе, что позволяет обеспечивать хорошую равномерность. Получены покрытия толщиной 1 мкм на пленке фторопласта шириной 20 см применительно к изготовлению импульсных конденсаторов.

На рисунке 10б представлена схема подключения приставок к типовой вакуумной установке для создания перепада давления при алюминировании стальной проволоки диаметром 1 мм. Отклоняющая и магнитная система позволяют менять положение электронного луча и режим испарения. Скорость протяжки составляет 1 см/сек. Время экспозиции в камере составляет 5-10 сек. Толщина пленки, измеренная по свидетелю, прикрепленному к проволоке, составляет 1 мкм.

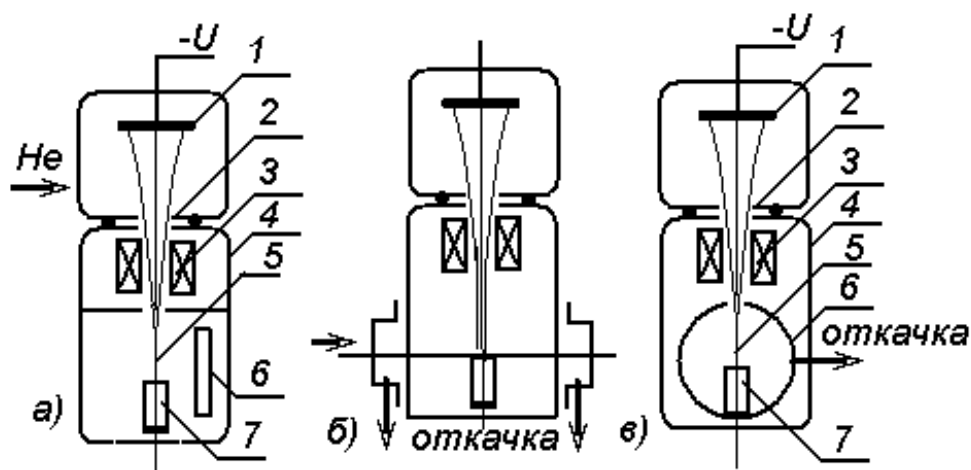


Рисунок 10 – а) схема устройства формирования пленок: 1– катод; 2– анод, 3 – магнитная линза; 4 – корпус; 5 – электронный луч; 6 – коллектор, 7 – испаряемый материал; б) схема подключения приставок, для создания перепада давления при обработке проволочных электротехнических материалов; в) схема переработки полимерных отходов

### Устройства для переработки полимеров

В последнее время возрастает необходимость переработки отходов

фторопласта, оргстекла, капролона в порошок или формирования антиискровых полимерных покрытий на инструменте. Существующие в настоящее время методы получения антиискровых покрытий основаны на погружении изделий в суспензию с полимером с последующей сушкой. Одним из путей решения указанных проблем может быть напыление пленки полимера (фторопласта) путем электронно-лучевого распыления отходов токарного производства.

На рис.10в представлена схема распылительного устройства, реализующего электронно-лучевое распыление капролона, оргстекла, а также распыление фторопласта добавляемого в вакуумные насосы в качестве антифризной добавки. При распылении полимеров (фторопласт, капролон, оргстекло) покрытие формируется на поверхности автономнооткачиваемого коллектора 6, в виде трубы диаметром 120 мм. Устройство нашло применение при отделении меди от пластмассы при производстве электродвигателей.

### **Основные результаты работы**

Основные результаты комплекса исследований и разработок можно кратко сформулировать следующим образом:

1. Впервые предложена методика определения механизма термодесорбции газов из электротехнических материалов на различных скоростях нагрева. Это сокращает время определения механизма термодесорбции и глубины залегания газов от 6-8 часов до полутора минут. Установлено, что спектр термодесорбции газов из металлов носит приоритетный характер в зависимости от скорости роста температуры. Если большей скорости нагрева соответствует меньший поток газовой выделения, то газ расположен в глубинных слоях. Полученные сведения позволяют более корректно настраивать процесс поточной электрофизической обработки проволоочных электротехнических материалов.

2. Предложена модель, объясняющая эволюцию формы потока пара в процессе формирования пленочных покрытий на электротехнических материалах. Определены границы применимости предлагаемой модели. Установлены закономерности, приводящие к изменению состава пленки, обнаружены эффекты влияния потока электронов и плазмы на формирование пленочных покрытий. Впервые установлено, что источник паров и подложка представляют собой взаимосвязанный единый комплекс. Впервые показано, что при формировании пленок в режиме натекания газа имеет место смещение

диаграммы фазных состояний в сторону меньших значений, пропорционально квадрату локального значения функции температуры. Это позволяет улучшить воспроизводимость параметров электротехнических изделий при изменении параметров системы. Установлены соотношения, позволяющие определить минимальное расстояние от испарителя до подложки при формировании пленок в условиях ограниченного пространства. Полученные результаты, в отличие от известных, открывают новые пути совершенствования систем для формирования пленок. Предложены геометрические и параметрические способы управления распределением толщины пленки по подложке. Электронный пучок и тлеющий разряд в потоке пара приводят к частичному экранированию конденсации пара на подложке. Это позволяет получать более мелкую фракцию конденсата, улучшать равномерность распределения толщины пленок или обеспечивать функциональное изменение толщины пленки при развертке пучка.

3. Впервые предложены электрофизические способы уменьшения необходимых откачных средств для создания вакуума в устройствах с вводом и выводом электротехнических материалов из атмосферы. В известные вакуумные методики расчета устройств внесены представления о структуре газового потока при изменении параметров газа. В итоге мощность необходимых откачных средств снижена от 5-10 до 0,5 кВт мм<sup>2</sup> площади отверстия, что на порядок превосходит известные устройства.

4. Предложены рекомендации по расчету устройств для электрофизической обработки электротехнических материалов. Разработаны устройства для формирования пленок и обработки длинномерных материалов.

В итоге работы разработан новый класс устройств – устройства для поточной обработки проволочных и рулонных электротехнических материалов, отличающиеся меньшей необходимой мощностью на поддержание вакуума, возможностью отжига, очистки и формирования пленки в ограниченном пространстве. Разработаны опытные образцы устройств для поточной обработки электротехнических материалов.

Таким образом, в результате исследований получены новые сведения об обработке длинномерных электротехнических материалов при пониженных давлениях, что соответствует основной цели работы.

## Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

### Цитируемая литература

1. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, 1976. – 808 с.

### Статьи в журналах, рекомендованные ВАК

1. Орликов, Н.Л. Метод изготовления оптических волноводов на стеклах / Н.Л. Орликов, Л.Н. Орликов, С.М. Шандаров // Радиотехника и электроника. - 2001.- №11.- С. 112-115.

2. Орликов, Н.Л. Влияние электронного пучка, выводимого через газодинамическое окно в газ, на создаваемый перепад давления / Л.Н Орликов, Н.Л. Орликов // Письма в ЖТФ (Technical Physics Letters) – 2000.– Т. 26.– № 12.– С.1091-1092.

3. Orlikov, N.L. The Geometric and Parametric Control of Gas Flow in a Gasdynamic Window / L.N. Orlikov, N.L. Orlikov // Technical Physics Letters. 2001. – V.27.– No 10. PP 881- 882. Translated from Pisma Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki.– V27.– No 20.– PP. 79-82.

4. Орликов, Н.Л. Повышение перепада давления через газодинамическое окно для вывода электронного пучка / Л.Н. Орликов, Н.Л. Орликов // ПМТФ.– 2001.– Т.42.– №5.– С. 3-7.

5. Орликов, Н.Л. Способы повышения эффективности вывода электронного пучка через газодинамическое окно / Л.Н. Орликов, Н.Л. Орликов // ПТЭ.– 2002.– №6.– С. 1-7

6. Орликов, Н.Л. Оптимизация управления потоком плазмы в сильноточном источнике частиц / Л.Н. Орликов, Н.Л. Орликов, С.М. Шандаров // Изв. Вузов. Физика. – 2007. – №9.– Приложение. – С. 260-263

7. Орликов, Н.Л. Динамические процессы при термовакuumном синтезе оптических нанослоев / Л.Н. Орликов, С.М. Шандаров, А.Г. Чугунов // Изв. Вузов. Сер. Физика.– 2009.– №8/2.– С. 354-357

8. Орликов, Н.Л. Управляемые генераторы ионных потоков / Л.Н. Орликов, С.И. Арестов, С.М. Шандаров // Доклады ТУСУРа.– 2010.– №2 (22). – Ч 2. – С. 93-96.

9. Орликов, Н.Л. Термодинамический анализ смещения параметров при формировании нанослоев в вакууме / Л.Н. Орликов, Н.Л. Орликов, С.И.

Арестов, С.М. Шандаров // Изв. Вузов. Сер. Физика, 2011. - №1/3. – С.157-160

10. Orlikov, L.N, and Orlikov N.L. Gas- discharge electron Sources With gas-dynamic beam output windows. /International Scietific Conference on Radiation-Thermal Effectes and Processes in inorganic Materials. 3-8 November, 2014, Tomsk, Russia. /Publ. IOP Confererce Series: Materials Science and Engineering V 81, conf 1 PP 1236-12042 (6). Publ 27 April 2015. [http:// iopscience iop org/1757-889x/1](http://iopscience.iop.org/1757-889x/1).

11. Orlikov, N.L. The combination methodic of diffusion and implantation technologies for creating optic wave-guided layers in Lithium Niobate. / L.N.Orlikov, N.L. Orlikov, S.I. Arestov, K.M. Mambetova, S.M. Shandarov. // Abs. International Scietific Conference on Radiation-Thermal Effectes and Processes in inorganic Materials. 3-8 November, 2014, Tomsk, Russia. /Publ. IOP Confererce Series: Materials Science and Engineering V 81, conf 1.- PP. 12043-12048 (6). Publ 27 April 2015. [http:// iopscience iop org/1757-889x/1](http://iopscience.iop.org/1757-889x/1).

12. Orlikov, N.L. Research of gas desorption mechanisms under metal wire heat treating. // S.A. Gyngazov, L.N. Orlikov //Systems. Methods. Technologies.– 2015.– N 2 (26).– PP. 128-132.

### Патенты

1. Пат 2187168 Российская Федерация, МПК H01J27/02, C23C14/46, H05H1/34. Устройство для ионной обработки материалов / Орликов Л.Н., Орликов Н.Л. Шандаров С.М.; заявитель и патентообладатель: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - № 2000131832/06; заявл.18.12.2000; опубл. 10.08.2002

2. Пат. 2204222 Российская Федерация. МПК <sup>7</sup> H05H7/00, H05H1/34 Устройство для вывода частиц / Орликов Л.Н., Орликов Н.Л.– №2001128080/06; заявл. 16.10. 2001; опубл. 10.05.2003.

3. Пат. 2191490 Российская Федерация, МПК <sup>7</sup> H05H7/00, H05H1/34. Устройство для вывода частиц / Орликов Л.Н., Орликов Н.Л.; заявитель и патентообладатель: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - № 2001124407/06; заявл. 3.09. 2001; опубл. 20.10.2002.

4. Пат. 2191489 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> H05H7/00, H05H1/34. Устройство для генерации и вывода частиц / Орликов Л.Н., Орликов Н.Л.; заявитель и патентообладатель: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - № 2001122852/06; заявл.14.08. 2001, опубл.

20.10.2002.

5. Патент 2223481 Российская Федерация. МПК<sup>7</sup> G01N25/00 Способ анализа газов на глубину залегания в материале / Орликов Н.Л., Орликов Л.Н.; заявитель и патентообладатель: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – №2001122851; заявл. 14.08.2001; опубл. 10.02.2004

### **Материалы конференций**

1. Орликов, Н.Л. Электронно-лучевая переработка фторопласта / Н.Л. Орликов, Л.Н. Орликов // Тезисы обл. научно-практ. конф. молодежи и студентов по техническим наукам и высоким технологиям (14-16 февраля). – Томск, 1995.— С. 23-24.

2. Орликов, Н.Л. Исследование спектров термодесорбции стали / Н.Л. Орликов, Л.Н. Орликов, Ю.Б. Шаропин // Тез. 2-й регион научно-техн. конф. студентов и молодых специалистов (20-22 мая). – Томск, 1997. —С.19-21.

3. Орликов, Н.Л. Газоразрядные устройства для поточной ионно-электронной обработки сварочных проволок / Н.Л.Орликов, Л.Н. Орликов, А.С. Шангин // Материалы 5-й Межд. научно-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (Сибресурс-5-99) (28-30 сентября).– Омск, 1999.— С. 27-29.

4. Орликов, Н.Л. Анализ содержания газов в стальной проволоке методом динамической масспектрометрии // Материалы 3-й регион научно-техн. конф. студентов и молодых специалистов (25-27 мая) – Томск, 1999. — С.59-61.

5. Орликов, Н.Л. Устройство для поточной обработки сварочных проволок на форвакууме /Н.Л. Орликов, Л.Н. Орликов, А.С. Шангин // Доклады 7 межд. науч-практ конф. «Интеллектуальные и природные ресурсы Сибири» (17-19 сент.)– Барнаул, 2001.– С. 192-193.

6. Орликов, Н.Л. Метод распознавания спектрограмм газов с помощью искусственной нейронной сети / Н.Л. Орликов, Р.С. Петраков // Сибирский студенческий семинар по новейшим телекоммуникационным технологиям (SIBCOM-2001) (28-29 ноября).– Томск, 2001.– С.17-18.

7. Орликов, Н.Л. Струйно-пучковые методы термовакuumного формирования пленок с функциональным распределением толщины /Н.Л. Орликов, Л.Н. Орликов, С.В. Смирнов, С.М. Шандаров // Proc. 12 th international

conf. on Radiation Physics and Chemistry of inorganic Materials.–Tomsk, 2003.– P. 377-381.

8. Орликов, Н.Л. Исследование механизма термодесорбции газов при ионной обработке металлических проволок. / Л.Н. Орликов, Н.Л. Орликов, С.М. Шандаров, Ю.А. Шибает // Труды 7 межд. конф. «Взаимодействие ионов с поверхностью – ВВП 2005» (23-29 авг.) – М.:– МАИ.– Звенигород, 2005.– С. 39-41.

9. Орликов, Н.Л. Исследование механизма десорбции газов при термической обработке металлических проволок / Л.Н. Орликов, Н.Л. Орликов, С.М. Шандаров // Труды VI международной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» (8-15 авг.) – Томск, 2008. – С.110-114.

10. Орликов, Н.Л. Поточная плазменная обработка сварочных проволок. / Н.Л. Орликов, С.А. Гынгазов, Л.Н. Орликов // сб. статей 13 международной научно-технической конференции: «Материалы и технологии 21 века». – Пенза: Приволжский дом знаний, 2015.– С. 45-47.

11. Орликов, Н.Л. Метод формирования пленок переменной толщины / Орликов Н.Л., С.А. Гынгазов, Л.Н. Орликов // сб. статей 13 международной научно-технической конференции: «Материалы и технологии 21 века». – Пенза: Приволжский дом знаний, 2015. – С. 56-59.