

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-2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель:

Носков Дмитрий Александрович

доктор технических наук, профессор

Научный консультант:

Гынгазов Сергей Анатольевич,

доктор технических наук

Официальные оппоненты:

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

Милонов Александр Станиславович, кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт
физического материаловедения Сибирского отделения Российской
Академии Наук» (г. Улан-Удэ), старший научный сотрудник

Ведущая организация:

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

Защита состоится « 15 » февраля 2017 г. в 16⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д212.269.10 на базе федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по
адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» и на сайте:

<http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>

Автореферат разослан « 15 » декабря 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последнее время расширяется применение методов обработки электротехнических материалов потоками электронов, ионов и плазмы, взамен энергоемких и громоздких механических и химических методов. Актуальность темы исследования определяется высокой потребностью в разработке электрофизических технологий, обеспечивающих эффективную высокопроизводительную обработку длинномерных электротехнических материалов и нанесение на них покрытий в условиях поточной обработки. Однако для реализации поточной электрофизической обработки с целью формирования защитных покрытий должны быть решены задачи ввода этих материалов из атмосферы в область низких давлений, очистки от загрязнений и газов, и вывода обратно в атмосферу. Условия обеспечения вакуума в ходе подобных операций пока еще недостаточно изучены. Недостаточно исследованы физико-химические процессы выделения газа из материала в ходе ионно-плазменной обработки, а также не изучены закономерности формирования покрытий в указанных условиях.

Актуальность работы в научном аспекте определяется необходимостью исследования процессов, сопровождающих поточную электрофизическую обработку длинномерных электротехнических материалов. Актуальность в прикладном аспекте определяется тем, что недостаточно разработаны основы проектирования проточных вакуумных систем с вводом материалов из атмосферы в область пониженного давления.

Степень разработанности темы. Исследованием процессов обработки электротехнических материалов с использованием электронов, ионов и плазмы при пониженном давлении, занимаются на многих предприятиях, а также во многих научно-исследовательских организациях. Однако, при вводе длинномерных материалов из атмосферы в вакуум, затраты мощности на поддержание рабочего давления на уровне 0,01 Па составляют около 10 кВт на 1 мм² площади выводного сечения, что сдерживает технологии поточной электрофизической обработки. В последнее время появились газоразрядные источники электронов, ионов и плазмы, работающие в форвакуумном диапазоне давлений 1-10 Па, обеспечиваемом только механическими вакуумными насосами. Но пока недостаточно изучены процессы обеспечения

вакуума при вводе материалов, процессы удаления газов, отжига материала, формирования пленочных покрытий в форвакуумном диапазоне давлений.

Объектом исследования являются промышленные процессы поточной электронно-ионной обработки металлических проволочных электротехнических материалов, которые вводятся из атмосферы в область газоразрядной плазмы высоковольтного тлеющего разряда с давлением 1-10 Па и выводятся обратно в атмосферу.

Предмет исследования. Процесс ионной очистки, удаления газов и отжига модифицированных электродных проволок марки С_в-12 ГС, для сварочных электродов марки Э-138/50 Н. Закономерности сорбционных процессов кислорода в таких материалах, определяющих коррозионную стойкость сварочных швов. Закономерности формирования защитного цинкового покрытия на железной проволоке в условиях совмещения процессов ионной очистки и отжига в ходе поточной обработки в проточной вакуумной системе с натеканием и откачкой газа. Закономерности поточной электрофизической обработки вольфрамовой и молибденовой проволок.

Цель работы - исследование физико-химических процессов, определяющих свойства длинномерных электротехнических материалов и изделий, при их обработке в проточных форвакуумных системах в условиях с непрерывным поступлением и откачкой газа и наносимых в таких условиях тонкопленочных покрытий.

Задачи, решаемые для достижения цели:

1. Разработка экспериментальной методики диагностики глубинного распределения газа, сорбированного в металлическом электротехническом длинномерном материале.

2. Исследование закономерностей формирования пленочных покрытий, получаемых методами термического испарения в форвакуумном диапазоне давлений 1-10 Па в условиях поточного производства с вводом и выводом изделий из вакуума.

3. Оптимизация параметров вакуумного оборудования, предназначенного для реализации промышленной поточной обработки с нанесением покрытий на электротехнические материалы и изделия.

4. Разработка рекомендаций по моделированию и проектированию вакуумного оборудования для поточной обработки электротехнических

материалов и изделий на их основе.

Научная новизна:

1. Впервые установлены закономерности десорбции газов из объема длинномерных металлических электротехнических материалов в зависимости от скорости нагрева и глубины расположения сорбированного газа, которые позволяют обосновать и реализовать технологические режимы эффективной очистки от газов.

2. Показано, что при термическом испарении материалов в проточных системах (с откачкой и напуском газа), химическое взаимодействие паров распыляемого материала с остаточной атмосферой происходит с меньшей интенсивностью по сравнению с условиями, когда формирование пленочных покрытий осуществляется в непроточных системах без напуска газа. Это обусловлено уменьшением температуры паров испаряемого вещества в области взаимодействия с напускаемым потоком газа.

3. Установлены закономерности формирования пленок в форвакуумном диапазоне давлений. Показано, что необходимым условием формирования пленки является превышение давления паров над давлением остаточного газа. Предложено геометрическое и параметрическое управление потоком паров металлов за счет перфорации и угловой ориентации плоскости испарения.

4. Предложена методика расчета взаимного расположения и геометрических параметров конструктивных элементов для ввода и вывода материала, использование которой повышает эффективность удаления газа из системы поточной обработки.

5. Впервые предложены электрофизические способы повышения эффективности удаления газа из проточных систем обработки материалов.

Научная значимость работы заключается в установлении закономерностей электрофизических процессов обработки электротехнических материалов при пониженных давлениях в проточных вакуумных системах.

Практическая значимость работы. Разработаны экспериментальные устройства и технологии для поточной ионной очистки и отжига стальной электродной проволоки, вольфрамовой проволоки для тел накала, молибденовой проволоки для держателей тел накала; предложены технологии формирования защитных и функциональных пленок в условиях форвакуума. Разработаны устройства для утилизации отходов фторопласта в порошок. Даны

практические рекомендации для проектирования систем с вводом материалов из атмосферы в область пониженного давления. Результаты работы могут найти применение в системах промышленного нагрева, а также в светотехнической и строительной промышленности. Результаты работы защищены 5-ю патентами.

Реализация работы. Результаты диссертационного исследования используются в научно-исследовательской работе ИФПМ СО РАН, а также в учебном процессе, на кафедре «Электронных приборов» ТУСУР.

Положения, выносимые на защиту:

1. В процессе нагрева металлического электротехнического материала в форвакуумном диапазоне давлений (1-10 Па) суммарное газовыделение формируется потоками с поверхности и внутренних слоев. Уменьшение суммарного потока газа с увеличением скорости нагрева, свидетельствует о смещении максимума распределения концентрации сорбированных газов вглубь материала. Это позволило получить данные о глубине локализации газа.

2. В условиях форвакуума механизм массопереноса изменяется от молекулярного (при низких давлениях) к рассеянию на газе со смещением области однородности паров в сторону источника. Это предоставляет возможность формирования равномерных по толщине пленочных покрытий в условиях ограниченных размеров рабочих камер вакуумных установок при повышенных давлениях остаточного газа.

3 Поступающий в камеру проточный газ понижает температуру паров материала, что приводит к снижению и скорости реакции паров испаряемого материала с компонентами рабочего газа по сравнению с непроточными системами. Это позволяет за счет изменения потока газа варьировать состав наносимой пленки от металлического до набора соединений металлов (переменного состава) с компонентами рабочего газа

4. В проточной вакуумной системе, содержащей последовательно расположенные камеру промежуточной откачки газа и рабочую камеру, зажигание локального дугового или тлеющего разряда в камере промежуточной откачки приводит к изменению вектора направленности и интенсивности потока газа вследствие его нагрева. Уменьшение интенсивности поступающего в рабочую камеру газового потока, позволяет снизить мощность, необходимую для откачки газа из рабочей камеры.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием независимых взаимодополняющих экспериментальных методик, большим объемом статистических данных (полученных на различных экспериментальных установках) и достаточно хорошим согласием экспериментального материала с результатами теоретических расчетов. Полученные сведения в целом согласуются с результатами других исследователей. Основные аспекты работы подробно представлены и обсуждены на всероссийских и международных конференциях, опубликованы в рецензируемых научных журналах и практически реализованы в виде конкретных устройств.

Личный вклад автора. Автор непосредственно участвовал в планировании и выполнении всех работ, явившихся основой представленной к защите диссертации. Им лично разработана и создана установка для очистки, отжига и формирования защитного покрытия (в едином технологическом цикле), проведены экспериментальные исследования, предложены и испытаны конструкции элементов ввода-вывода обрабатываемых материалов. Автором самостоятельно проведен анализ полученных результатов, выдвинуты защищаемые научные положения и сформулированы выводы по работе.

Апробация работы. Материалы, изложенные в диссертационной работе, обсуждались на международных конференциях: «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-98, АПЭП 2000, АПЭП 2002). – Новосибирск, 1998 г., 2000 г., 2002 г.; «Высоковольтная микроволновая электроника»: МИА-МЕ'99. - Новосибирск, 1999 г; «Измерения и контроль» (ИКИ-2000). - Барнаул, 2000 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 и патенты. По теме диссертационной работы опубликовано 12 научных статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 46 статей в материалах международных и Всероссийских конференций, а также в

сборниках научных трудов. Получено 5 патентов на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Работа изложена на 139 страницах, содержит 46 рисунков, 11 таблиц, 1 приложение и список использованных источников из 186 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, даны оценки научной новизны и практической значимости диссертационного исследования. Приведены сведения о личном вкладе автора в выполненные исследования и об апробации результатов диссертационной работы.

В первой главе «Исследование глубины залегания газа в стальной проволоке» проведен обзор методов по определению глубины залегания газа в материале, исходя из анализа кривых газовыделения, десорбционных кривых и данных о коэффициентах диффузии. Показана неопределенность известных методик в определении глубины залегания газа в материале. Описан экспериментальный комплекс для исследования газов, выделяющихся из металлических проволоочных материалов (сталь, вольфрам, молибден) на базе типовой вакуумной установки УВН-2М с измерителем парциальных давлений ИПДО-1.

Приводится описание методов и методология исследований. Анализ экспериментальных результатов проводился с привлечением методов математического моделирования, использующих аппарат динамики газовых потоков. Измерения толщины пленок осуществлялись на микроскопах МИИ-4, МИМ-7. Направление реакции взаимодействия паров с остаточным газом оценивалось на основе измерений давления в ходе напыления. Оценка изменений в составе пленки проводилась по данным измерения показателя преломления на эллипсометре ЛЭМ-2. В отдельных случаях элементный состав покрытий исследовался на растровом сканирующем микроскопе HITACHI TM 3000. Визуализация потока пара и газа проводилась в плазме тлеющего разряда.

Потоки выделяющихся газов и их спектр оценивались измерителем парциальных давлений ИПДО-1, с записью интенсивности компонент спектра

на осциллограф С8-17 с приставкой для расширения времени развертки.

На рисунке 1а представлены осциллограммы изменения температуры и потока кислорода при различных скоростях нагрева стальной электродной проволоки диаметром 3 мм длиной 30 см. На рисунке 1б представлена условная схема различия глубинного и поверхностного газов. В результате исследований установлено, что если большей скорости нагрева соответствует меньшее количество газа, то газ расположен в глубинных слоях (патент 2223481).

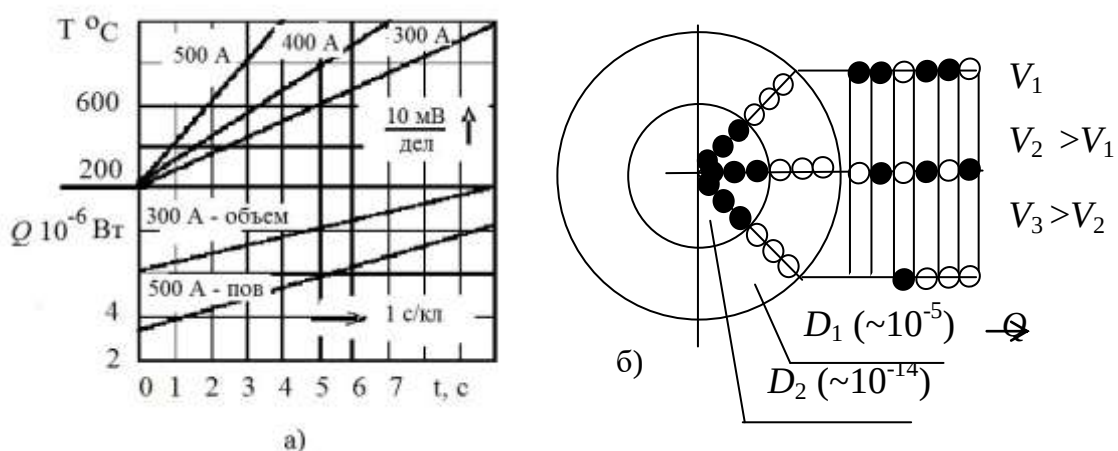


Рисунок 1. а) осциллограммы изменения температуры и потока кислорода от времени; б) условная схема перераспределения потоков газа при различных скоростях нагрева

Рассмотренные в главе 1 особенности выделения газов из длинномерных электротехнических материалов использованы для оптимизации режимов удаления газов и отжига перед формированием защитных цинковых покрытий при поточной обработке материала. Однако недостаточно исследованным является влияние процесса натекания газа через вводные элементы на параметры защитного покрытия, осаждаемого на материале. Решению этих задач посвящена глава 2.

Во второй главе «Исследование формирования защитных пленочных покрытий при обработке длинномерных электротехнических материалов» выполнено изучение формирования защитных цинковых и свинцовых пленочных покрытий на длинномерных электротехнических материалах. Для выяснения картины формирования потока пара испаряемого материала, проводилась визуализация паров цинка и свинца в тлеющем разряде

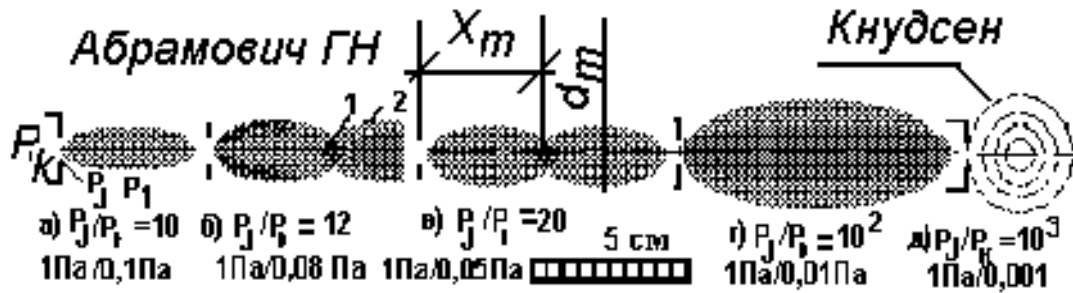


Рисунок 2 – Форма потока пара цинка при визуализации в тлеющем разряде

Результаты визуализации (рисунок 2) показывают, 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 . Обычно, в теории динамики газовых потоков это отношение характеризуют коэффициентом скорости потока λ , равным отношению скорости потока к скорости звука. (При неподвижном газе $\lambda=0$, при скорости потока, равной скорости звука $\lambda=1$, при сверхзвуковой скорости потока $\lambda \rightarrow 2,5$). Характерные продольные и поперечные размеры потока описываются выражениями [1]:

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

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

где d – характерный размер отверстия истечения; k – показатель адиабаты (для пара $k=1,3$; для воздуха $k=1,4$); (В первом приближении $P_j=1$ Па).

В таблице 1 приведены параметры потока газа и пара

Табл. 1. Некоторые значения параметров потока газа и пара

P_j/P_1	1	1,1	1,89	7,69	37,0	200	300	555
λ	0	0,5	1,00	1,62	1,90	2,15	2,10	2,23
d_m/d	1	1,0	1,00	3,00	5,00	10,0	11,00	11,50

Установлено, что в диапазоне эффективной работы вакуумного оборудования ($P_j/P_1 \approx 200$) при расстояниях $X_m \approx 10d$, наблюдается относительное постоянство давления в поперечном и продольном сечении потока. Это открывает возможность формировать покрытия при малых расстояниях. Для практических применений при давлениях 1-10 Па предложено управление потоком паров металлов за счет перфорации и угловой ориентации плоскости испарения. Например, при срезе тигля под углом поток пара

начинает расширяться в нижней точке среза. При этом реализуется *геометрическое управление* потоком пара. Локальный угол среза тигля φ 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° . При согласовании системы достигается равномерность толщины пленки на уровне 2% на расстоянии около десяти размеров поперечника площади испарения. Это позволяет формировать равномерные по толщине покрытия в протяженных вакуумных камерах ограниченного размера, например, внутри трубчатых элементов.

Обнаружено, что в условиях поточной обработки в системах с напуском и откачкой газа, химическое взаимодействие паров распыляемого материала с рабочим газом идет с меньшей интенсивностью по сравнению с системами без напуска газа. Качественное объяснение изменения состава пленки следует из анализа функций изменения температуры ($\tau(\lambda)$) и давления ($\pi(\lambda) = \tau(\lambda)^{k(k-1)}$), представленных в таблице 2 [1], а также из диаграммы изобарного потенциала ΔZ , (рис. 3), построенной для свинца и титана, как наиболее удобных вариантов для сравнения.

Таблица 2. Значения функций изменения температуры и давления

P_j/P_1	1	1,1	1,89	7,69	37,0	200	300	555
λ	0	0,5	1,00	1,62	1,90	2,15	2,10	2,23
$\tau(\lambda)$	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

Как следует из таблицы 2, например при ($P_j/P_1 \approx 200$), значение функции температуры уменьшилось почти в 5 раз. Величина изобарного потенциала определяется соотношением

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

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

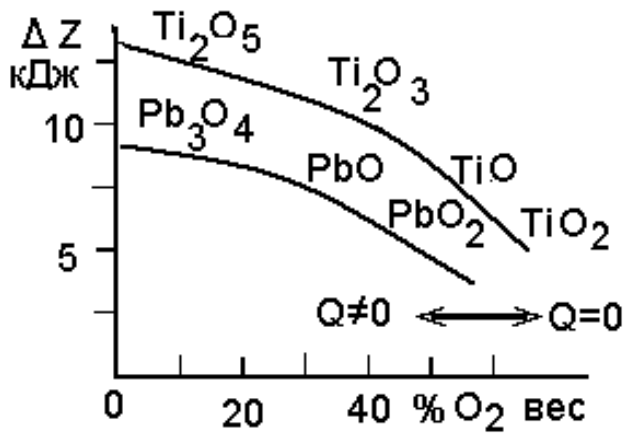


Рисунок 3 – Тенденция смещения диаграммы изобарного потенциала при изменении расхода напускаемого газа

Функция температуры $\tau(\lambda)$ примерно равна функции давления $\pi(\lambda)$, поэтому изобарный потенциал запишется в виде:

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

То есть изменение (уменьшение) изобарного потенциала пропорционально квадрату функции изменения температуры, которая уменьшается при увеличении скорости потока. Соответственно уменьшается скорость реакции пара с рабочим газом.

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

Установленные в главе 2 закономерности формирования пленок в системе с натеканием и откачкой газа ставят задачу уменьшения потребляемой мощности вакуумных насосов, которая составляет около 10 кВт на 1 мм² площади отверстия для ввода и вывода материала. Решению этих задач посвящена глава 3.

Глава 3: «Исследование условий уменьшения потребляемой мощности для ввода длинномерных материалов из атмосферы в вакуум и вывода из вакуума в атмосферу». На рисунке 4 представлена схема устройства для исследования. Визуализация потока газа в тлеющем разряде показала, что картины истечения потока газа и потока пара металла подобны. (Для паров металла картина течения представлена на рисунке 2).

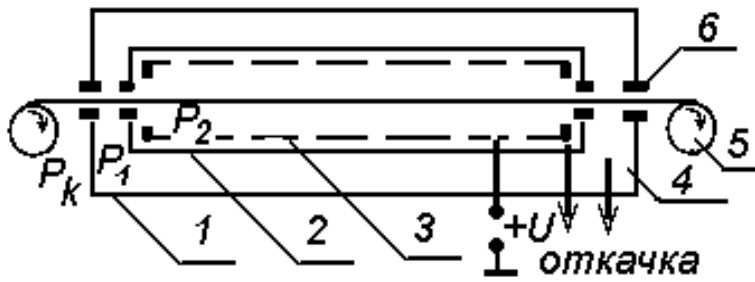


Рисунок 4 – Схема устройства для обработки проволоочных материалов. 1,2 – цилиндры, 3 – сетка, 4 – камера промежуточной откачки, 5 – приемный барабан, 6 – выводные элементы.

В ходе экспериментов установлено, что при малом расстоянии h между элементами эффективность промежуточной откачки газа уменьшается, а расход газа, откачиваемого между выводными элементами, подчиняется выражению:

$$Q = P_1 S h / X_m, \quad (6)$$

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. 5 представлена обобщенная зависимость оптимального расстояния от перепада давления на первой ступени откачки.

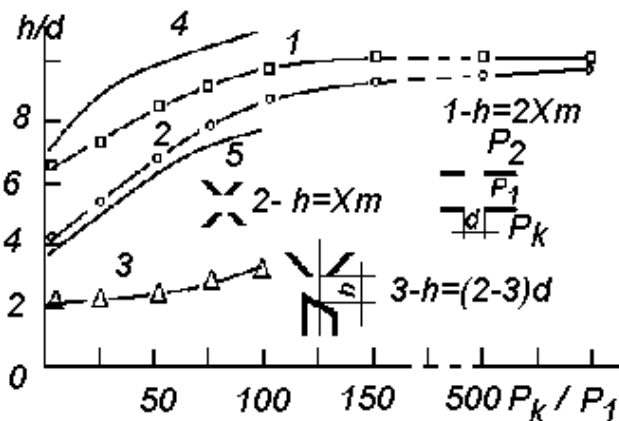


Рисунок 5 – Зависимость оптимального расстояния между элементами от перепада давления на первой ступени откачки. 1, 2, 3 – эксперимент; 4, 5 – расчет для плоских и острых выводных элементов

Если выводной элемент срезан под углом (кривая 3), то из-за неравномерности расширения газа, возникает поперечный градиент давления, и газ отклоняется в сторону среза (от направления протяжки проволоки). Усиление отклонения потока газа достигается нагревом газа локальным разрядом между выводными элементами. Основным механизмом отклонения газа при разряде можно считать термобароэффект, при котором разность температур вызывает разность давлений. Срез элементов и локальный разряд позволили уменьшить необходимую мощность откачных средств от 10 до 0,5 кВт на мм² площади выводного отверстия.

В четвертой главе «Конструирование устройств для электрофизической обработки электротехнических материалов» рассмотрено моделирование и проектирование устройств для обработки длинномерных электротехнических материалов.

Расчет необходимой вводимой мощности проводится по оценке баланса теплоты, необходимой для нагрева проволоки 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, Δt - 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 которых перепад давления максимален (см. рис. 5).

Далее в главе 4 рассмотрены некоторые конструкции устройств для ионной очистки, отжига, и формирования покрытий на электротехнических материалах. При конструировании учитывался опыт [2,3], полученный при разработке плазменных источников электронов в форвакуумном диапазоне давлений. На рисунке 6 представлена схема устройства для ионной очистки и отжига вольфрамовых проволок, как альтернатива очистки в щелочах.

Для повышения стабильности системы введена гальваническая развязка (емкость C). При пробое СВЧ напряжение передается на возбуждение разряда между элементами. Разряд меняет направление натекания газа и восстанавливает стабильность системы. (Патент 2191490). Скорость протяжки составляет 1-5 м/с при напряжении 5 кВ и токе до 60 мА. Диаметр отверстий составляет 1 мм. Откачка проводится двумя насосами НВПР -16.

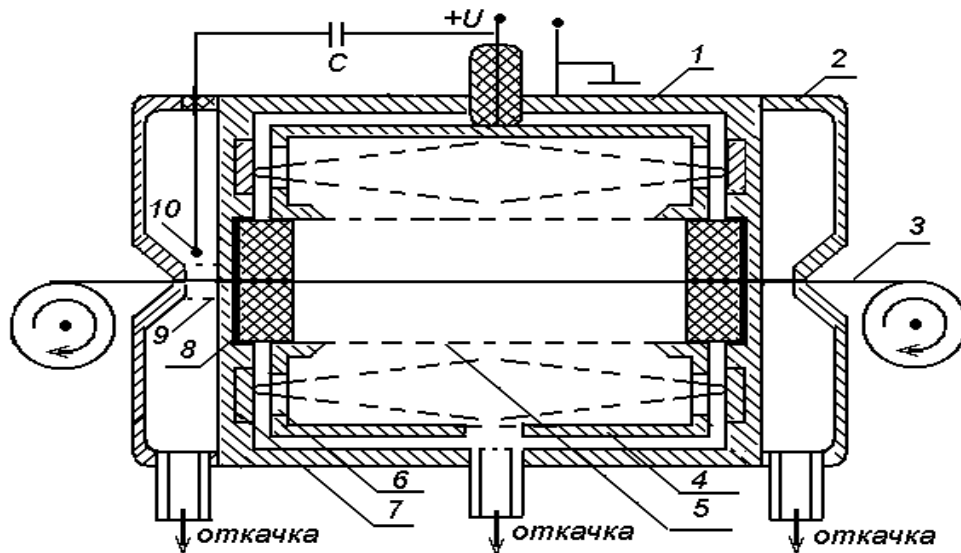


Рисунок 6 – Схема устройства для ионной очистки и отжига вольфрамовых проволок. 1 – корпус; 2 – камера промежуточной откачки; 3 – проволока; 4, 5 – цилиндры; 6 – анод; 7 – катод; 8 – держатели, 9 – сетка, 10 – электрод

На рисунке 7 представлена принципиальная схема устройства для приоритетной электронной или ионной обработки стальных проволок диаметром от 1 до 3 мм.

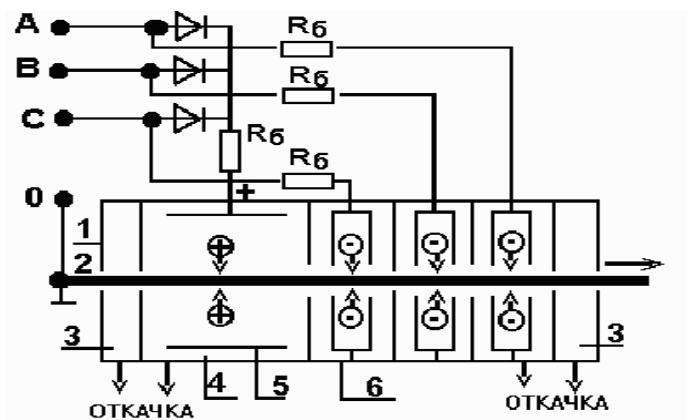


Рисунок 7 – Схема устройства для приоритетной электронной или ионной обработки стальных проволок. 1 – корпус, 2 – проволока, 3 – камера промежуточной откачки, 4 – генератор плазмы, 5 – анод, 6 – нагреватели.

Всё устройство питается от промышленной сети 380 В. Три диода типа Д-250 включены в цепь генератора плазмы. При откачке промежуточных камер 3 и генератора плазмы 4 двумя насосами НВПР-16 в промежуточной камере 3 и генераторе плазмы 4 устанавливается давление соответственно 100 и 10 Па.

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.

На рисунке 8 представлена принципиальная схема устройства для очистки и отжига 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 ($U_1=90\text{ В}$, 150 А). Отжиг проволок проводится электрическим током, пропускаемым между устройствами. Запуск дуги проводится поджигающим импульсом ($U_3=18\text{ кВ}$, 50 мкА). Откачка газа водовольцевым насосом ВВН-3 до давления 20 кПа позволяют реализовать режим плазменного сильноточного контакта большой площади.

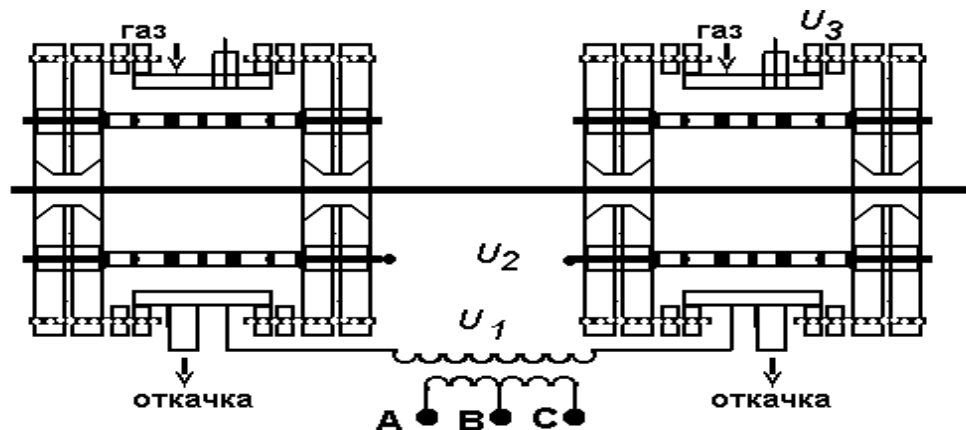


Рисунок 8 – Схема устройства для обработки электродной проволоки

Уплотнение элементов и электрическая изоляция выполнены из асбеста. Скорость протяжки составляет 0,1-1 м/с при температуре проволоки 500°C . Общая мощность установки составляет 10 кВт.

На рисунке 9а представлена схема устройства для металлизации (алюминирования) рулонного фторопласта применительно к изготовлению импульсных конденсаторов типа ФГТИ. При обеспечении в камере давления инертного газа (гелия) 10- 80 Па и подаче на холодный катод отрицательного потенциала (до 15 кВ) в системе возбуждается высоковольтный тлеющий разряд. Ионы из плазмы разряда устремляются на катод, из которого в результате 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. Получены покрытия

толщиной 1 мкм на пленке фторопласта шириной 20 см.

На рисунке 9б 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. Преобладание скоростей молекул, превышающих тепловую, позволяет получить хорошую адгезию. Особенностью является диффузное рассеяние паров на газе, что обеспечивает хорошую равномерность и отсутствие теневого эффекта.

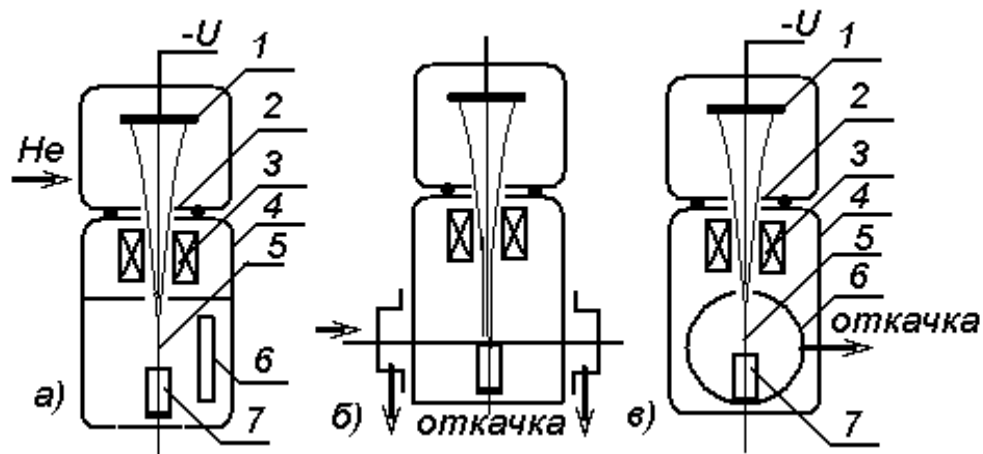


Рисунок 9 – а) схема устройства формирования пленок: 1– катод; 2– анод, 3 – магнитная линза; 4 – корпус; 5 – электронный луч; 6 – коллектор, 7 – испаряемый материал;

б) схема подключения приставок, для создания перепада давления при обработке проволочных электротехнических материалов;

На рис.9в представлена схема распылительного устройства, реализующего электронно-лучевое распыление капролона, оргстекла, а также фторопласта (используемого в качестве присадки уменьшающей трение). Покрытие формируется на поверхности автономно откачиваемого коллектора 6, в виде трубы диаметром 120 мм. Устройство нашло применение при отделении меди от пластмассы в производстве электродвигателей и при изготовлении анти искрового инструмента.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые предложена методика диагностики глубины залегания газов в электротехническом материале, основанная на установленной экспериментально взаимосвязи потока газа, выделяющегося при нагреве, с глубиной его залегания в материале. Полученные сведения позволяют более корректно управлять процессом поточной электрофизической обработки проволочных электротехнических материалов.

2. Показано, что при термическом испарении материалов в проточных системах (с откачкой и напуском газа) эффективность химического взаимодействия паров распыляемого материала с парами окружающей атмосферы существенно уменьшается по сравнению с процессами формирования пленочных покрытий в непроточных системах без напуска газа. Это обусловлено уменьшением температуры в зоне взаимодействия с испаряемым материалом за счет охлаждения напускаемым потоком газа.

3. Исследованы закономерности формирования покрытий в проточных системах в условиях ограниченного пространства. Предложены методы геометрического и параметрического управления потоком пара, что позволяет варьировать структуру и состав наносимой пленки при существенном снижении размеров действующих установок.

4. Установлены электрофизические принципы и предложен метод проектирования взаимного расположения и формы элементов для ввода/вывода материала в ходе поточной обработки. В итоге на порядок снижена мощность необходимых откачных средств (от 10 до 0,5 кВт мм²) на единицу площади отверстия по сравнению с известными устройствами.

5. Разработан новый класс устройств для поточной обработки проволочных и рулонных электротехнических материалов, отличающиеся меньшей необходимой мощностью на поддержание вакуума, возможностью отжига, очистки и формирования пленки в ограниченном пространстве. Созданы опытные образцы установок поточной обработки электротехнических материалов.

Цитированная литература

1. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, 1976. – 808 с.
2. Бурдовицын, В.А. Форвакуумные плазменные источники электронов / А.В. Бурдовицын, А.С. Климов, А.В. Медовник, Е.М. Окс, Ю.Г. Юшков. – Томск: Томский государственный университет, 2014. – 288 с.
3. Орликов, Л.Н. Вопросы теории и практики вывода в газ низкоэнергетических электронных пучков // Л.Н. Орликов. Томск: Томский государственный университет, 2002. – 150 с.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованные ВАК РФ

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 ⁷ 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 ⁷ 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, МПК⁷ 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. МПК⁷ 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

Статьи в сборниках трудов конференций и другие публикации

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 – ВИП 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.

