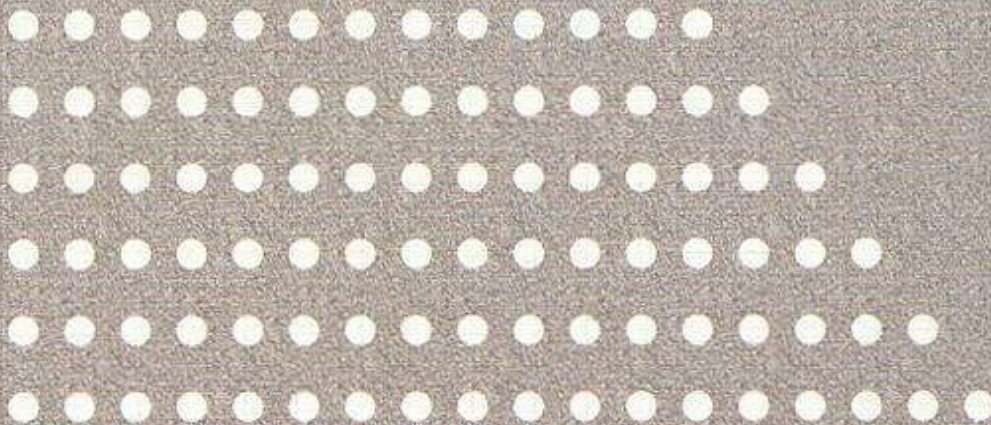


*И.М. ПАСТУХ*

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА  
БЕЗВОДОРОДНОГО АЗОТИРОВАНИЯ  
В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ**



**Библиотека ОТТОМ**



НАЦИОНАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
«ХАРЬКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

*И. М. ПАСТУХ*

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА  
БЕЗВОДОРОДНОГО  
АЗОТИРОВАНИЯ В ТЛЕЮЩЕМ  
РАЗРЯДЕ**

*Под общей редакцией И. М. Неклюдова, В. М. Шулаева*

**Харьков  
2006**

УДК 621.78/(66.088+537.52+66.046)

ББК 34.55+34.52:34.651

И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. - 361 с

Систематизированы процессы, происходящие при вакуумно-диффузионной обработке металлических поверхностей в тлеющем разряде, на основе анализа известных моделей их и общих положений физики электрического разряда в газе предложена энергетическая модель формирования модифицированного слоя. Изложены некоторые методики исследований, в том числе – обработки данных, алгоритмы расчета параметров процесса. Проведен анализ возможных конструктивных схем установок для реализации технологии. Разработаны инженерные методики проектирования некоторых систем и оборудования в целом. Выполнен анализ организационно-экономических факторов промышленного применения технологии.

Книга рассчитана на научно-технический и инженерный персонал, занимающийся как исследованием технологических процессов вакуумно-диффузионной газоразрядной обработки металлов. Она может быть также использоваться в учебном процессе подготовки специалистов соответствующего профиля и квалификации.

Книга содержит 163 рисунков, 36 таблиц, 236 ссылок.

Рецензенты:

доктор технических наук Л. Н. Дейнеко  
доктор технических наук А. П. Чейлях

Утверждено к печати Ученым советом Института физики твердого тела, материаловедения и технологий Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт»

Научное издание

ISBN 966-8855-14-0

©ННЦ ХФТИ, 2006

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

Предисловие.....	6
Перечень ссылок.....	7
Введение.....	8
Перечень ссылок.....	9
<i>Глава 1. Теоретические основы процесса.....</i>	<i>25</i>
1.1    Введение в основы процесса.....	25
1.1.1.    Классификация процессов и терминология.....	25
1.1.2.    Краткий анализ моделей процесса.....	32
Перечень ссылок.....	44
1.2    Теоретические исследования процесса.....	47
1.2.1.    Общие теоретические положения.....	47
1.2.2.    Средняя скорость электронов.....	60
1.2.3.    Связь скорости электронов с энергетикой разряда	71
Перечень ссылок.....	76
1.3    Реальные газоразрядные процессы.....	78
1.3.1.    Параметры реальных газоразрядных процессов....	78
1.3.1.1.    Ударная ионизация.....	79
1.3.1.2.    Ступенчатая ионизация.....	79
1.3.1.3.    Рекомбинация.....	79
1.3.1.4.    Ударная рекомбинация.....	82
1.3.1.5.    Рекомбинация атомарных ионов.....	83
1.3.1.6.    Диссоциативная рекомбинация.....	83
1.3.1.7.    Диссоциация молекул электронным ударом.....	84
1.3.1.8.    Резонансная перезарядка.....	84
1.3.1.9.    Упругие столкновения электронов с частицами....	85
1.3.1.10.    Ступенчатая ионизация атомарных частиц.....	86
1.3.1.11.    Ширина ОКП.....	87
1.3.1.12.    Средняя скорость электронов.....	89
1.3.1.13.    Модель формирования электронного тока.....	94
1.3.2.    Электрические параметры реальных процессов....	96
1.3.3.    Особенности моделей многофакторных систем....	105
Перечень ссылок.....	111
1.4.    Энергетика частиц падающего потока.....	113
1.4.1.    Кинетика прикатодных процессов.....	113
1.4.2.    Кинетика формирования падающего потока.....	129
1.4.3.    Энергетический спектр падающего потока.....	155
Перечень ссылок.....	171
1.5.    Процессы на границе газ-поверхность.....	173
1.5.1.    Взаимодействие падающего потока и поверхности	173
1.5.2.    Модель процессов на границе газ-поверхность....	186
Перечень ссылок.....	208
<i>Глава 2. Технологические особенности процесса.....</i>	<i>210</i>

2.1.	Управляемость технологического процесса.....	210
2.1.1.	Введение в систему параметров управляемости....	210
2.1.2.	Структура и взаимосвязь компонентов модели управления ВДГРТ модификации поверхности.....	214
2.2..	Влияние локальных исключений на поверхности..	232
2.3.	Температура поверхности деталей в процессе ВДГРТ модификации металлов.....	238
2.4.	Типовые технологические режимы безводородного азотирования в тлеющем разряде.	249
	Перечень ссылок.....	265
<i>Глава 3. Оборудование для реализации процесса.....</i>		268
3.1.	Общие сведения об установках АТР.....	268
	Перечень ссылок.....	274
3.2.	Анализ конструктивных схем установок.....	274
3.3.	Проектирование систем установок для АТР.....	288
3.3.1.	Разрядные камеры.....	288
3.3.1.1.	Классификация конструктивных схем камер.....	288
3.3.1.2.	Формирование размеров разрядных камер.....	289
3.3.1.3.	Проектирование главных элементов камер.....	292
3.3.2.	Система подготовки газовой среды.....	317
3.3.3.	Система очистки поверхности катодным распылением.....	321
3.3.4.	Контроллер процесса азотирования.....	327
	Перечень ссылок.....	333
3.4.	Практическая реализация процесса АТР.....	334
	Перечень ссылок.....	343
<i>Глава 4. Организационно-экономические предпосылки внедрения БАТР.....</i>		345
4.1.	Особенности нормирования и экономических пока процессов ВДГРТ обработки деталей.....	345
4.2	Экономические предпосылки внедрения ВДГРТ модификации поверхности.....	352
4.2.1.	Экономические аспекты структуры оборудования	352
4.2.2.	Концепция профилактического обслуживания.....	357
4.2.3.	Концепция региональных сервисных центров модификации.....	360
	Перечень ссылок.....	360

***Условные сокращения, принятые в книге***

<b>ВДГРТ</b>	Вакуумно-диффузионная газоразрядная технология
<b>АТР</b>	Азотирование в тлеющем разряде
<b>ПНФТЦ</b>	Подольский научный физико-технологический центр
<b>ХНУ</b>	Хмельницкого национального университета <a href="http://www.tup.km.ua/science/pnftc">www.tup.km.ua/science/pnftc</a> pnftc@beta.tup.km.ua
<b>БАТР</b>	Безводородное азотирование в тлеющем разряде
<b>ЭРГ</b>	Электрический разряд в газе
<b>N75Ar25</b>	Пример кодирования состава газовой среды (в процентах по объему) – азота 75%, аргона – 25%
<b>ОКП</b>	Область катодного падения напряжения
<b>ЦКР</b>	Циклически коммутируемый разряд
<b>ППТР</b>	Потенциал перехода в тлеющий разряд
<b>ПСП</b>	Прослойка свободного пробега частиц
<b>ЭСПП</b>	Энергетический спектр падающего потока
<b>СДСП</b>	Средняя длина свободного пробега
<b>ПБДН</b>	Прослойка бесстолкновительного движения нейтралов
<b>ОЭФ</b>	Относительный энергетический фактор
<b>КОО</b>	Критериально -ориентированная оценка
<b>КРР</b>	Коэффициент результативности реализаций
<b>РГС</b>	Рабочая газовая среда
<b>ОМКР</b>	Очистка металлов катодным распылением

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Технология обработки металлических изделий практически всегда является компромиссом двух противоречащих положений: обрабатываемость металла должна быть хорошей, по этой причине желательно применение мягких и дешевых материалов, не требующих жестких режимов изменения формы и размеров, а также инструментов, не обладающих способностью к форсированным параметрам этих режимов; эксплуатационные требования к изделиям только в отдельных случаях (объекты типа корпусных деталей) не определяют необходимости в высоких характеристиках твердости, износостойкости и иных особых свойствах поверхности или даже всего объема. По этой причине известны и применяются в зависимости от условий производства и особенностей эксплуатации более сотни видов технологических процессов обработки металлов с целью обеспечения наиболее оптимального сочетания отмеченных выше требований [1]. Однако практически ни один из них не может претендовать на право преимущественного или универсального применения. Каждый вид технологического процесса имеет свою нишу оптимальных условий использования, включая даже технологические традиции, сложившиеся на конкретном предприятии. По этой причине и рассматриваемая технология не будет представляться как универсальная, однако в заключительной части книги будут предложены организационно-экономические подходы, оптимизирующие практическую сторону ее использования.

Историография металловедения и термической обработки выделяет начало 60-х годов прошлого столетия как границу условного перехода от объемных методов модификации свойств металлических изделий к поверхностным. Именно тогда возникло новое направление в обработке металлических сплавов – инженерия поверхности. Этот процесс во многом связан с необходимостью более экономного расходования энергетических ресурсов, ибо известно, что практически все критерии работоспособности, включая и в значительной мере прочность, формируются прежде всего за счет свойств поверхностных слоев и именно они должны модифицироваться в первую очередь. Действительно все детали изнашиваются по поверхности, усталостные трещины преимущественно образуются от поверхности, термостойкость прежде всего касается поверхности. Что же касается прочности, то в результате обработки, вызывающей достаточно значительные сжимающие напряжения на поверхности, существенно увеличиваются и прочностные характеристики деталей машин.

Технология, о которой пойдет речь ниже, реализуется в газовой среде пониженного давления при воздействии на газовый промежуток электрического поля между анодом и катодом, причем в общем случае обрабатываемая деталь может быть как катодом (преимущественно встречающийся вариант), так и анодом или с переменным чередованием этой функции, при этом активные элементы среды образуют с компонентами поверхности различные соединения или твердые растворы в этой среде [2, 3].

Общая методология изложения материала в данной работе сводится к краткому анализу состояния теории, систематизации основных положений процесса, теоретической проработке процессов, реально имеющих место в газовой среде и на поверхности обрабатываемых изделий, анализу конструктивных схем оборудования для реализации технологии, включая инженерные методики и рекомендации по проектированию отдельных систем и установок в целом, изложению технологических особенностей процесса, а также организационно-экономических предпосылок, способствующих практическому использованию технологии.

Материал книги в основном базируется на результатах исследований, выполненных в Подольском научном физико-технологическом центре Хмельницкого национального университета (ПНФТЦ ХНУ), берущем свое начало от лаборатории, основанной Каплуном В. Г., чьи работы положили начало исследованиям азотирования в безводородных средах. Особую благодарность автор выносит сотрудникам центра Давыдову А. М., Здыбелю А. С. за совместное участие в исследованиях.

Отдельная признательность Национальному научному центру «Харьковский физико-технический институт» и в первую очередь Шулаеву В. М., чье подвижничество в организации международных конференций «Оборудование и технологии термической обработки металлов» (ОТТОМ) в немалой степени способствовало проведению исследований и предопределило издание этой работы.

## **ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК**

1. Термическая обработка в машиностроении: Справочник/Под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта.- М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.

5. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Азотирование стали. М.: Машиностроение, 1976. 256 с.

12. Ионная химико-термическая обработка сплавов/Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти.- М.: Изд-во МГТУ им Баумана, 1999.- 400 с.



## **ВВЕДЕНИЕ**

Основы теории диффузных процессов обработки поверхности металлических сплавов были заложены еще в начале прошлого столетия (Чижевский М. П., [1]). Теоретические исследования в основном начались только в 40-х годах, когда были определены константы диффузии в зависимости от конкретных условий процесса [2-12]. Главные результаты по разработке научных основ модификации поверхности металлических сплавов были получены после 1962 г. благодаря научным школам Лахтина Ю. М. и Арзамасова Б. Н.. Именно в этот период начался переход от объемной обработки металлических деталей, которая самая по себе требует значительных энергетических и трудовых затрат, к поверхностной обработке как более экономичной. Тогда же были изучены условия для создания разряда как активатора процесса, установлены состав газа в прикатодной зоне в зависимости от параметров технологического режима, характеристики диффузных слоев и другие основополагающие критерии. Разработаны модели процессов диффузного насыщения, которые условно можно разделить на опытно-эмпирические, термодинамические, технологические. В конечном варианте принцип реализации процесса был сформирован Лахтиным Ю. М. солидарно с группой немецких ученых, суть которого заключается в образовании соединений железа и азота в плазме, адсорбции нитридов поверхностью, их преобразовании под действием разряда и последующей диффузии атомарного азота в поверхность. Тем не менее, эта модель была пересмотрена Арзамасовым Б. Н., исходя из той точки зрения, что соединение железа с азотом в плазме невозможно. Поэтому ведущая роль им отводится ионам атомарного азота, они же и определяют эффективность процесса, поскольку проникают в поверхность и уже там образуют нитриды [13-26]. Тогда же была выдвинута гипотеза относительно роли удельной мощности разряда как главного фактора максимальной плотности энергии плазмы, обеспечивающей наибольшую толщину диффузионного слоя [27]. Аналогичного взгляда придерживаются некоторые немецкие ученые [28-30]. Следует отметить, что вышеупомянутые модели имеют один общий недостаток: они базируются на опосредствованных данных или на общих показателях состояния модификационного комплекса (например, его термодинамического состояния [31]). В тот же время для разработки подходов к управляемой технологии нужен более тонкий механизм, который бы учитывал по возможности глубинные процессы,

имеющие место в прикатодной зоне вокруг детали. Именно в этом случае станут понятными многие явления, которые влияют на конечный результат обработки поверхности металлических сплавов.

Следует отметить, что в последнее время наблюдается возвращение к теме исследования вакуумно-диффузионных газоразрядных процессов модификации поверхности. Причем в большинстве случаев подходы связаны именно с использованием положений физики электрического разряда в газе [32-119].

Тем не менее, непосредственное использование этих исследований к прикладной задаче осложнено тем, что в большинстве случаев они не базируются на экспериментальной апробации с использованием реальных промышленных установок. Известно, что переход от лабораторного оборудования во многих случаях служит причиной существенных отличий и необходимости внесения корректив в методики. Поэтому реализация исследований, результаты которых приведены в этой книге, базируются на основополагающих принципах физики электрического разряда в газе [121-127, 130-133, 136] и также с учетом технологических особенностей процесса в совокупности с данными эксплуатации реального оборудования. В значительной степени материал книги базируется на работах автора, в том числе и с соавторами [128, 129, 134, 135, 142, 143, 148-203]. Для удобства пользования в каждом разделе приводятся перечни главных ссылок (для сокращения - без указания дублирующих, полный перечень которых приведен ниже).

### **ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК**

1. Чижевский В. П. Железо и азот// Известия Томского Технологического института. 1913. Т. 31. № 3, с. 1-91.
2. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Шпис Х.- Й., Бемер З. Теория и технология азотирования. М.: Металлургия, 1991. 320 с.
3. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Азотирование стали. М.: Машиностроение, 1976. 256 с.
4. Лахтин Ю. М. Физические основы процесса азотирования. М.: Машгиз, 1948. 14 с.
5. Лахтин Ю. М., М., Силина Н. В., Федчун В. А. Структура и свойства азотированных бинарных сплавов...// МиТОМ. 1977. №1. С. 2-7.
6. Лахтин Ю. М., М., Силина Н. В. Природа высокой твердости легированного феррита после азотирования// МиТОМ. 1977. №6. С. 23-31.
7. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Булгач А. А. Азотирование в машиностроении// Сб. Научных трудов МАДИ. 1986. С. 42-59.
8. Лахтин Ю. М., Булгач А. А. Теория химико-термической

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
обработки стали. М.: Машиностроение, 1982. 53 с.

9. Прокошкин Д. А. Химические и термические методы обработки стали// Сб. трудов МИСиС. ОНТИ. 1938. С. 3-133.

10. Белоцкий А. В. Структура азотистых фаз и принципы легирования сталей для азотирования// МиТОМ. 1975. №12. С. 24-27.

11. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Булгач А. А. Расчет влияния легирующих элементов на растворимость и диффузию азота в фазах в сталях в процессе азотирования// Труды МАДИ. 1978. С. 42-59.

12. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Александров В. А. Новые системы контроля процесса азотирования// МиТОМ. 1978. №4. С. 47-51.

13. Лахтин Ю. М., Крымский Ю. Н., Семенов В. А. Азотирование высокопрочного чугуна в тлеющем разряде// МиТОМ, 1964. №3. С. 37-41.

14. Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах. М.: Машиностроение, 1979. 224 с.

15. Арзамасов Б. Н., Михайлов И. А. Исследование некоторых процессов ионного азотирования. М.: ТОСИНТИ. 1967. №18-16-1319/113\ 12 с.

16. Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка сплавов в активизированных газовых средах// Вестник машиностроения, 1986. №9. С. 49-53.

17. Михайлов И. А. Ионные соотношения при разрядном азотировании, МиТОМ, 1965. №10, С. 50-51.

18. Михайлов И. А. Исследование каналовых лучей в тлеющем разряде при азотировании// В кн.: Защитные покрытия на металлах. К.: Наукова думка, 1967. Вып. 1. С. 81-86.

19. Панайоти Т. А. Азотирование высокопрочных сталей и сплавов в тлеющем разряде. М.: Машиностроение, 1989. 40 с.

20. Бабад-Захряпин А. А., Кузнецов Г. Д. Химико-термическая обработка в тлеющем разряде. М.: Атомиздат, 1975. 175 с.

21. Лахтин Ю. М., Крымский Ю. Н. Физические процессы при ионном азотировании// в кн.: Защитные покрытия на металлах. К.: Наукова думка, 1968. Вып. 2. С. 225-229.

22. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Структура и прочность азотированных сплавов. М.: Металлургия, 1982.

23. Арзамасов Б. Н., Братухин А. Г., Елисеев Ю. С., Панайоти Т. А. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана. 1999. 400 с.

24. Бутенко О. И., Головчинер Я. М., Скотников С. А. Формирование диффузионного слоя при ионном азотировании// в

кн.: Прогрессивные методы термической и химико-термической обработки. М.: Машиностроение. 1972. С. 122-128.

25. Бутенко О. И. Лахтин Ю. М. О механизме ускорения диффузии азота в железе при ионном насыщении// МиТОМ, 1969. №6. С. 21-24.

26. Коган Я. Д., Солодкин Г. А. Термодинамические основы регулируемых процессов азотирования// МиТОМ, 1981. №4. С. 16-20.

27. Арзамасов Б. Н., Панайоти Т. А. Роль удельной мощности разряда при ионной химико-термической обработке сплавов// МиТОМ, 2000. №.: С. 31-34.

28. Edenhofer V. Fortschritte in Prozessregelung beim Plasma nitriden// Harten-Technische Mitteilung. 1989. Bd. 44, #6. S. 339-345.

29. Keller K. Schichtaufbau glimmitrieren Eisenwerkstoffe// Harten-Technische Mitteilung. 1971. Bd. 26, #2. S. 120-128.

30. Edenhorer V. Möglichkeiten und Grenzen der Plasmaaufkohlung: Vorgetragen auf dem 45. Hartenrei-Kolloquium// Harten-Technische Mitteilung. 1990. Bd. 45, #3. S. 154-162.

31. Межанов А. Е., Кольцов В. Е. Термодинамическая модель процесса азотирования в тлеющем разряде// Методы поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента: Труды МАДИ. М., 1983. С. 53-59.

32. Bogdanov A.V., Dubrovsky G.V., Krutikov M.P. Interaction of gases with surfaces: Detailed description of elementary processes a.kinetics– Berlin etc.: Springer. – 1995. – XIV,132 с: ил. –(Lecture notes in physics.N.S.m:Monographs; N25 ан).– Германия.

33. Holemár A., Hruby V. Iontova nitridace v praxi– Praha : SNTL, 1989. – 242 с.

34. Козырев А. В. Прикатодные процессы и их влияние на форму протекания тока в газовом и вакуумном разряде: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра физ.-мат. наук: 05.27.02 / Ин-т сильноточной электроники. – Томск, 1995.

35. Кристя В. И.. Моделирование взаимодействия поверхности твердого тела с плазмой тлеющего разряда и разработка физических основ прогнозирования свойств холодных катодов: Автореф. дис. . д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / НИИ материалов электронной техники. – М., 1996. – 35 с.

36. Ламонов И. М. Создание научных основ и разработка комплексов электротехнического оборудования для восстановления и упрочнения деталей в энергетике методом ионно-плазменной обработки: Дис. . д-ра техн. наук: 05.09.03. – Акмола; Запорожье, 1996. – 263 с.

37. Овчинников Б. М., Парусов В. В. Исследование механизма

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде пропорционального разряда в смесях газов / Б. М. Овчинников, В. В. Парусов. – М., 1999. – 9, [2] с. : ил.; 29 см. – (Препринт / Рос. акад. наук. Ин-т ядер. исслед.; ИЯИ – 1008/99).*

38. Оганян Г. В. Повышение надежности твердосплавных инструментов путем ионного азотирования и нанесения износостойкого покрытия: Дис. канд. техн. наук: 05.03.01. – М., 1994. – 229 с.

39. Рубинштейн В. М. Упрочнение инструментальных материалов нанесением кремнийсодержащих покрытий в низкотемпературной плазме: Автореф. дис. . к. . наук: 05.16.01 / Курск. гос. техн. ун-т. – Курск, 1998. – 23 с.

40. Семенов М. Ю. Разработка метода расчета режимов ионной нитроцементации, обеспечивающих заданный химический и фазовый состав диффузионного слоя легированных сталей: Автореф. дис. . канд. техн. наук: 05.16.01. – М., 1999. – 15 с.

41. Сенчило И. А. Теоретические и технологические основы направленного улучшения свойств поверхностных слоев изделий из инструментальных материалов посредством их ионно-вакуумной модификации: Автореф. дис. . д-ра техн. наук: 05.03.01; 05.02.08 / Санкт-Петербург. гос. техн. ун-т. – СПб., 1995. – 33 с.

42. Солодухин И. А. Структура и механические свойства вакуумно-плазменных покрытий, синтезированных на облученных ионами аргона подложках: Автореф. дис. . канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. – Минск, 1999. – 18 с.

43. Чекалова Е. А. Повышение надежности режущего инструмента путем нанесения ионно-плазменных покрытий с оптимальным составом газовой среды: Дис. . канд. техн. наук: 05.03.01. – М., 1997. – 280 с.

44. Швейгерт И. В. Математическое моделирование катодной области самодеятельного тлеющего разряда в инертных газах: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.02.05 / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т теорет. и прикл. механики. – Новосибирск, 1989. – 15 с.

45. Alonso, J A. Electrons in metals and alloys / J. A. Alonso, N. H. March. – London etc. : Acad. press, Cop. 1989. – XI, 603 с.

46. Eisenberg S. Plasmadiffusionsbehandlung von Titan und Titanlegierungen. – Dusseldorf: VDI Verl.. – 1988. – 8, 170 с.

47. Klumper-Westkamp H. Entwicklung und Anwendung eines Nitriertensors zur in-situ-Erfassung des Nitrierprozesses: Diss. – Dusseldorf. – 1989. – 202 с.

48. Krzyzanowski M. Umocnienie powierzchniowe stopow zelaza przy wykorzystaniu nagrzewania plazmowego = Surface hardening of iron alloys using arc plasma heating / Michal Krzyzanowski. – Krakow :



Wydaw. AGH, 1995. – 100 с.

49. Niessen W. Simulation der Aufbauphase einer Hochspannungs-Niederdruckgasentladung mit Monte-Carlo-Methoden. – Karlsruhe. – 1990. – 83 с.

50. Schumacher U. Anwendung der Plasma-Randschichttheorie zur Modellierung von RF-Niederdruck-Gasentladungen und Reaktordesign: Diss.. – Stuttgart. – 1995. – 106 S.

51. Tovbin J.K. Lattice-gas model in kinetic theory of gas-solid interface processes. – New York etc.: Pergamon press. – 1990. – 235 S.

52. Александров, Николай Леонидович. Кинетика электронов и отрицательных ионов в слабоионизованной неравновесной плазме: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра физ.-мат. наук: 01.04.08 / Ин-т атомной энергии. – М., 1991. – 29 с.

53. Аушева Ф.А. Пространственное разделение компонентов в газоразрядной плазме в бинарной и тройной смесях инертных газов: Дис. . канд. физ.-мат. наук: 01.04.08. – М., 1994. – 141 с.

54. Бабаева Н. Ю. Моделирование газодинамических явлений в неравновесной плазме тлеющих и СВЧ разрядов: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.04.08 / Рос. АН Ин-т высоких температур. – М., 1993. – 22 с.

55. Баклицкий Б. Е. Атомные столкновения в газах и на поверхности твердого тела [Б. Е. Баклицкий, И. С. Битенский, Войцеховский И. А. и др.] Отв. ред. Ю. А. Рыжов; АН УзССР, Ин-т электрон. им. У. А. Арифова. – Ташкент: Фан. – 1988. – 178 с.

56. Башлов Н. Л. Законы подобия газовых разрядов и их применение для исследования плазмы: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.04.05; 01.04.08 / Ленингр. гос. ун-т. – Л., 1990. – 16 с.

57. Блинов Н. В., Н. В. Блинов, Ю. Е. Горбачев, Д. В. Кульгинов Квазиклассическая Т-амплитуда неупругого рассеяния атомов газа поверхностью твердого тела. – 1989. – 41 с

58. Брик В. Б. Диффузия и фазовые превращения в приповерхностном (рабочем) слое металлов: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / АН УССР. Ин-т проблем материаловед. им. И.Н.Францевича. – Киев, 1991. – 32 с.

59. Васильев Л. А. Распад оксидов переходных металлов (Ti, Zr, Nb, Hf, Ta) под воздействием ионов Ar низких энергий: Автореф. дис. . канд. физ.-мат. наук: 01.04.04 / Всесоюзный н.-и. центр по изучению свойств поверхности и вакуума. – М., 1988. – 18 с.

60. Галиаскаров Э. Г. Образование и гибель атомов водорода в тлеющем разряде пониженного давления в водороде и его смесях с азотом: Автореф. дис. к. хим. наук: 02.00.04 / Ивановская гос. хим.-техн. акад. – Иваново, 1997. – 16 с.

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*

61. Горбунов Н. А. Экспериментальное и теоретическое исследование функции распределения электронов по энергиям в плазме низких и средних давлений: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.04.08; 01.04.05 / ЛГУ. – Л., 1989. – 16 с.

62. Григорьев С. Н. Повышение надежности режущего инструмента путем комплексной ионно-плазменной поверхностной обработки: Дис. . д-ра техн. наук: 05.03.01. – М., 1995. – 497 с.

63. Щеглов В. А., Басов Н. Г.. Динамика элементарных атомно-молекулярных процессов в газе и плазме– М.: Наука. – 1991. – 205 с.

64. Динамические модели ионизирующейся плазмы / Н. Е. Андреев, И. Л. Бейгман, М. Е. Вейсман и др. – М., 1998. – 11 с.

65. Евстифеев В.В. Рассеяние тяжелых ионов низкой энергии поверхностью металлов: Дис. .д-ра.физ.-мат.наук: 01.04.07. – Ташкент, 1993. – 342 с.

66. Елисеев Ю. С. Разработка новой технологии изготовления и упрочнения ионным азотированием зубчатых колес авиационных ГТД: Дис. . канд. техн. наук: 05.07.05. – М., 1998. – 216 с.

67. А. П. Ершов, А. А. Кузовников, В. П. Савинов Физика граничных слоев плазмы/МГУ им. М. В. Ломоносова, Физ. фак., Каф. физ. электрон.. – М.: Изд-во МГУ. – 1990. – 77 с.

68. Жабицкий М. Г., Силаков В. П. Расчет кинетических коэффициентов электронов в низкотемпературной азотной плазме– Б.м.. – 1988. – 23 с.

69. Иванов В. А. Лебедев В. С., Марченко В. С.Рекомбинация атомарных ионов с электронами в плазме смешанных инертных газов–Б.м.. – 1988. – 8 с.

70. Иванов В. А. Кинетика возбужденных и заряженных частиц в неизотермической рекомбинационно-неравновесной плазме инертных газов и их смесей: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра физ.-мат. наук: 01.04.05 / ЛГУ. – Л., 1989. – 31 с.

71. ИоновЮ. Г. Автоматизированные плазмотехнологические комплексы обработки материалов (Основные вопросы теории и проектирования): Автореф. дис. . д-ра техн. наук: 05.09.03. – СПб., 1999. – 32 с.

72. Карпухин С. Д. Исследование влияния структуры азотированных сталей на контактную усталость и разработка технологии предварительной термической обработки и ионного азотирования зубчатых колес из стали 16X2H3MФБАЮ-Ш: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.16.01 / Моск. гос. техн. ун-т. – М., 1992. – 16 с.

73. Катин В. В. Неупругое распыление материалов многозарядными ионами: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.04.08 / Ин-т атомной энергии им. И.В.Курчатова. –

М., 1989. – 16 с.

74. Квазиклассическая теория столкновений в газах [Г. В. Дубровский, А. В. Богданов, Ю. Е. Горбачев, И. Ф. Головнев] Отв. ред. Н. Г. Преображенский; АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т теорет. и прикл. механики. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние. – 1989. – 198 с.

75. Кокаревич Г. П. Электрический пробой в вакууме и газе при пониженном давлении. Том. гос. архитектур.-строит. акад.. – Томск: Изд-во Том. ун-та. – 1996. – 173 с.

76. Колобов В. П. Кинетика электронов в приэлектродных явлениях и ионизационных волнах: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.04.08 / ЛГУ. – Л., 1989. – 15 с

77. Корнич Г. В. Диффузионное приближение при описании преимущественного распыления двухкомпонентных сплавов и эволюции примесных профилей в ходе послыоного анализа ионами средних энергий: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Донец. ун-т. – Донецк, 1990. – 20 с.

78. Корсакова О. С. Механизмы формирования угловых и энергетических распределений атомов, распыленных с поверхности кристаллов при ионной бомбардировке: Дис. . канд. физ.-мат. наук: 01.01.03. – М., 1997. – 183 с.

79. Косов В. Н. Диффузионная нестабильность и эффективные коэффициенты диффузии в некоторых трехкомпонентных газовых смесях: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.04.14 / Урал. политехн. ин-т им. С.М.Кирова. – Свердловск, 1989. – 24 с.

80. Кравцова Е. А. Влияние вакуумно-диффузионного упрочнения на стойкость штампового инструмента для горячего деформирования: Автореф. дис. . канд. техн. наук: 05.16.01 / Тольяттинский политехнич. ин-т. – Тольятти, 1998. – 18 с.

81. Крылов Е. В. Подвижность ионов в газе в умеренно сильных электрических полях: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.04.04 / Ин-т электроники АН РУз. – Санкт-Петербург, 1995. – 15 с.

82. Кузьмичев Д. А. Математическое моделирование газоразрядных систем: Дис. . канд. физ.-мат. наук: 05.13.16. – М., 1998. – 161 с.

83. Лукьянова А. В. Численное моделирование плазмо-химических процессов в газовых разрядах низкого давления: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.04.08 / МГУ им. М.В. Ломоносова. НИИ ядерной физики. – М., 1991. – 14 с.

84. Майоров С. А. Компьютерное моделирование динамики и кинетики неравновесных процессов в плазме: Дис. . д-ра физ.-мат.

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
наук: 01.04.08. – М., 1995. – 303 с.

85. Машков А. В. Функции распределения электронов по энергиям, физические параметры плазмы и скорости элементарных процессов в плазме тлеющего разряда смесей аргона, кислорода и озона: Дис. . канд. физ.-мат. наук: 02.00.04. – Иваново, 1997. – 159 с.

86. Мишева М. В. Применение микропроцессорных средств в управлении и регулировании электротехнологических установок с сильноточным тлеющим разрядом: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.09.12 / Энерг. ин-т. – М., 1992. – 17 с.

87. Намитоков К. К. Пахомов П. Л., Харин С. Н. Математическое моделирование процессов в газоразрядной плазме. АН КазССР, Ин-т математики и механики. – Алма-Ата: Наука КазССР. – 1988. – 207 с.

88. Насыров Ш. Г. Исследование и синтез системы компьютерной поддержки разработки технологии нанесения коррозионно-стойких ионно-плазменных покрытий: Дис. . канд. техн. наук: 05.13.07. – Оренбург, 1997. – 198 с.

89. Новиков Н. Д. Физические основы управляемого ионно-плазменного синтеза функциональных углеродных покрытий: Дис. . канд. физ.-мат. наук: 01.04.04. – М., 1998. – 223 с.

90. Новицкий Д. А. Тройная ион-ионная рекомбинация в слабоионизованном газе и плазме: Дис. . канд. физ.-мат. наук: 01.04.08. – Долгопрудный, 1998. – 92 с.

91. Осипенко М. А. Математическое моделирование физических процессов поверхностного упрочнения стальных образцов: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.01.03 / МГУ им. М.В. Ломоносова. – М., 1992. – 17 с.

92. Поздеев П. А. Пристеночные процессы в потоках многокомпонентной химически реагирующей плазмы: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.04.08 / АН СССР. Ин-т высоких температур. – М., 1990. – 19 с.

93. Попович В. И. Кинетика неупругих процессов с участием возбужденных молекул и атомов в азот- и кислородсодержащей плазме: Автореф. дис. . канд. физ.-мат. наук: 01.04.08 / Ин-т высоких температур. – М., 1992. – 18 с.

94. Протасевич Е. Т. Словарь-справочник по физике и диагностике газового разряда / М-во общ. и проф. образования Рос. Федерации. Том. политехн. ун-т. – Томск, 1999. – 82 с.

95. Протасевич Е. Т. Холодная неравновесная плазма : Генерация, свойства, обл. применения / Е. Т. Протасевич. – Томск, 1997. – 191 с.

96. Рыжов В. В. Компьютерное моделирование физических процессов при воздействии ионов и электронов на поверхность и газ:

Дис. . д-ра физ.-мат. наук: 01.04.04. – Томск, 1995. – 161 с.

97. Серебровская Л. Н. Поверхностное упрочнение инструментальных и конструкционных материалов комбинированными методами обработки: Дис. . канд. техн. наук: 05.16.01. – Курск, 1999. – 120 с.

98. Струминский В. В., Турков В. Е. О явлениях переноса в многокомпонентных газовых смесях–Б.м.. – 1987. – 50 с.

99. Табаков В. П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе сложных нитридов и карбонитридов титана / В. П. Табаков; М-во общ. и проф. образования РФ. Ульянов. гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 1998. – 122 с.

100. Фатуллаев А. Г. Математическое моделирование структур тлеющего разряда: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 05.13.16 / МГУ им. М.В. Ломоносова. – М., 1990. – 15 с.

101. Черковец В.Е. Кинетика электронов, возбужденных атомов и молекул в неравновесном приэлектродном слое газоразрядной плазмы: Дис. . д-ра физ.-мат. наук: 01.04.08. – М., 1993. – 320 с.

102. Головизнин В. М., Коротких С. С., Фатуллаев А. Г. Численное моделирование нестационарного амбиполярного переноса в газоразрядной плазме.–Б.м.. – 1988. – 15 с.

103. Юдин Б. И. Исследование тепловых процессов в полом катоде: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.04.14 / Ин-т теплофизики. – Новосибирск, 1991. – 20 с.

104. Юрова И. Ю. Сечения рассеяния электронов атмосферными газами/ Отв. ред. В. Н. Островский; АН СССР, Кол. науч. центр им. С. М. Кирова, Поляр. геофиз. ин-т –Б.м.. – 1989. – 144 с.

105. Vilallonga Ed.:E., Rabitz H.A.. Gas-surface dynamics- Amsterdam etc.: Elsevier. – 1994, 275 с:

106. Gerritsen E. Surface modification of metals by ion implantation: Diss.. - Groningen. - 1990, 125 с.

107. Gjernes E., Fjellerup J. Thermodynamical and transport properties of gases- Riso (Roskilde): Riso nat. lab.. - 1994. - 30 p.

108. International workshop on interaction of gases with solids affecting vacuum processes. (1; 1995; Magdeburg). Proceedings IGS 1. Guest ed.:Ch.Edelmann. - Oxford etc: Pergamon press. - 1996. - 315-400,IV с: -(Vacuum;ISSN 0042-207X; Vol.47,N 4,spec.iss.).

109. Martan J. Modelowanie rozkladow koncentracji implantowanych jonow w ciele stalym. - Wroclaw. - 1997. - 109 s.

110. Metal, Treatments against wear, corrosion, fretting and fatigue / Ed. by R. B. Waterhouse a. A. Niku-Lari. - Oxford etc. : Pergamon press, 1988. - XVI, 238 с.

111. Platkowski T. Teoria kinetyczna gazow z dyskretnym



*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде rozkladem predkosc: Modelowanie,rozwiązania zagadnień granicznych. - Warszawa. - 1993. - 67 s.*

112. Агейкова, Людмила Николаевна. Математическая модель радиационно-стимулированной диффузии в сплавах: Автореф. дис. . канд. физ.-мат. наук: 05.13.16 / Алтайский гос. техн. ун-т. - Барнаул, 1998. - 22 с.

113. Барвинок В. А., Богданович В. И. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления / В. А. Барвинок, В. И. Богданович. - М. : Машиностроение, 1999. - 309 с.

114. Беляев Г. Я. и др. Теоретические основы обеспечения качества и производительности упрочняющих технологий. Ч. 1 . - 1998. - 158 с. Ч. 2 . - 1998. - 130 с.

115. Будилов В. В. Технология вакуумного ионно-плазменного нанесения покрытий : Учеб. пособие / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. - Уфа : УГАТУ, 1993. - 76 с.

116. Вольяс В.А. Козырев А.Б. Физика слабоионизированной плазмы: Прикладные вопросы ионно-плазменного распыления-СПб.: ТОО "Складень". - 1997. - 130 с.

117. Домбровский Ю. М. Физические и технологические основы метода поверхностного плазменного упрочнения: Автореф. дис. . д-ра техн. наук: 05.02.01. - Ростов-на-Дону, 1999. - 51 с.

118. Елисеев Э. А. Разработка процесса ионного азотирования с предшествующей ему пластической деформацией для повышения контактной долговечности никельсодержащих низкоуглеродистых сталей мартенситного класса: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.16.01 / Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э.Баумана. - М., 1995. - 16 с.

119. Смирнов А.М. Повышение качества изделий из инструментальных сталей посредством ионно-вакуумной модификации их поверхностей: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.техн.наук:05.02.08:05.03.01. -СПб, 1993. -15 с.

120. Новий тлумачний словник української мови – В 4-х томах/ Укл. В. В. Яременко, О. М. Сліпущко. – К.: Аконтіт, 1999, т.2, с. 667.

121. А.Г. Жиглинский, В.В. Кучинский. Массоперенос при взаимодействии плазмы с поверхностью. – М.: Энергоатомиздат, 1991. –206 с.

122. Биберман Л.М. Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. - М.: Наука, 1982. – 374 с.

123. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992. – 535 с.

124. Мирдель Г. Электрофизика. – М.: Мир, 1972. – 608 с.
125. Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов. – М.: Наука, 1980. –416 с.
126. Швилкин Б.Н. Газовая электроника и физика плазмы в задачах. – М.: Наука, 1978, 159 с..
127. Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов/ Справочник. – К.: Наукова думка, 1981, с. 15.
128. Пастух І. М. Процеси вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій модифікації поверхні металевих сплавів. – Хмельницький: Вісник ТУП;- 2000;- №6; С. 124-135.
129. Пастух І. М. Факторы управляемости вакуумно-диффузионными газоразрядными технологиями модификации поверхности металлов. – Хмельницький: Проблеми трибології; - 2001;- №2; С. 93-96.
130. Вайнштейн Л. А., Собельман И. И., Юков Е. А. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. – М.: Наука, 1979. – 320 с.
131. Смирнов Б. М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат, 1974, с. 456.
132. Смирнов Б. М. Введение в физику плазмы. М.: Наука, 1982, с. 224.
133. Смирнов Б. М. Физика слабоионизированного газа в задачах и решениях. М.: Наука, 1978, с. 416.
134. Пастух І. М. Алгоритми та компоненти моделювання газорозрядних процесів вакуумно-дифузійних технологій. – Хмельницький: Вісник технологічного університету Поділля; - 2001; - №5, С. 99-107.
135. Пастух І. М. Методика обробки даних багатofакторних моделей. – Хмельницький: Вісник технологічного університету Поділля; - 2002; - №6, С. 42-46.
136. Г. Бёрд. Молекулярная газовая динамика. – М: Мир, 1981. – 309 с.
137. И.М. Соболев. Численные методы Монте-Карло. – М.: Наука, 1973.
138. И.М. Соболев. Методы Монте-Карло. – М.: Наука, 1978. – 68 с.
139. Р. Лактам Вакуумная изоляция установок высокого напряжения/ Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1985, 187 с.
140. Б. И. Москалев Разряд с полым катодом. М.: Энергия, 1969, с. 103.
141. Кирьянов В. Д. Самоучитель MathCAD 2001. –СПб.: БХВ-Петербург. 2001.- 544 с.
142. Пастух І. М. Організаційно-економічні передумови

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде впровадження газорозрядних вакуумно-дифузійних технологій модифікації поверхні металів. – Хмельницький: Вісник ТУП;- 2001;- №6; С. 126-133.*

143. Пастух І. М. Зовнішні локальні винятки металевих поверхонь та їх вплив на параметри режиму модифікації. – Хмельницький: Вісник ТУП;- 2001;- №3; С. 43-47.

144. Прочность, устойчивость, колебания/ Справочник в 3-х томах под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968, т.1 – 831 с., т. 2 – 463 с., т.3 – 568 с.

145. Бидерман В. Л. Механика тонкостенных конструкций. Статика. – М.: Машиностроение, -1977, 488 с.

146. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1976, 408 с.

147. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки/ Пер. с англ., М.: Физматгиз, 1963, с. 636.

148. Пастух І.М. Моделювання деяких процесів електричного розряду в газі// Вісник ТУП, Хмельницький. – 2000, №3, ч.2 “Технічні науки”. – с. 172-177.

149. Пастух И.М, Каплун В.Г. Плазменно-диффузионные процессы модификации поверхности металлов: технология и оборудование// Труды международного научно-практического симпозиума «Оборудование и технология термической обработки металлов и сплавов», Харьков, авг. 2000 г. – с. 145-154.

150. Пастух И.М., Каплун В.Г., Рудык А. Е. Повышение надежности и долговечности конструкционных элементов упрочнением поверхности диффузионным ионно-плазменным методом// Доповіді міжнародної науково-технічної конференції “Надійність машин та прогнозування їх ресурсу”, Ів.-Франківськ, вер. 2000 р. – с. 435-444.

151. Каплун В.Г., Пастух И.М. Ионные технологии нанесения диффузионных покрытий в плазме тлеющего разряда// Доклады научно-технической конференции «Новые технологии, методы обработки и упрочнения деталей энергетических установок», Запорожье, окт. 2000 г. – с. 78-80.

152. Камера розрядна з повітряним охолодженням. Патент України на корисну модель №573 від 16.10.2000.

153. Камера розрядна для зміцнення тонких пластинок. Патент України на корисну модель №576 від 16.10.2000.

154. Камера розрядна з вакуумною оболонкою. Патент України на корисну модель №574 від 16.10.2000.

155. Камера розрядна комбінованого типу. Патент України на корисну модель №575 від 16.10.2000.

156.. Пастух І. М., Давидов А. М., Здибель О. С., Лотоцька І. А.

Оптимізація енергетики фази катодного розпилення процесу модифікації металевих поверхонь.// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, Хмельницький. – 2000, №3. – с. 203-206.

157. Пастух І.М. Структура та конструктивні схеми машин для вакуумно-дифузійної модифікації поверхні металів.// Вісник ТУП, Хмельницький. – 2001, №1, ч.1 “Технічні науки”. – с. 168-175.

158. Каплун В. Г., Пастух І. М. Енерго-зберігальна екологічно-чиста технологія і обладнання для зміцнення поверхонь деталей машин.// Доповіді 5-го міжнародного наукового симпозіуму інженерів-механіків. Львів, травень 2001 р. – с. 129.

159. Пастух И. М. Модель формирования падающего потока вакуумно-диффузионной газоразрядной модификации поверхности металлов. // Сборник докладов 2-го международного симпозиума «Оборудование и технология термической обработки металлов и сплавов», Харьков, сент. 2001 г. – с. 35-40.

160. Пастух И.М. Методология управления вакуумно-диффузионными газоразрядными технологиями модификации поверхности металлов.// Сборник докладов 4-го международного симпозиума «Вакуумные технологии и оборудование», Харьков, апрель 2001 г. – с. 435-439.

161. Багатокамерна установка для дифузійного зміцнення поверхні металевих виробів. Патент України 31606А від 15.12.2000.

162. Установка для поверхневого зміцнення металів з двоступеневим блоком живлення. Патент України 31607А від 15.12.2000.

163. Герметизуючий стик вакуумних установок поверхневого зміцнення металів. Патент України 31608А від 15.12.2000.

164. Багатопозиційна установка для поверхневого зміцнення металів. Патент України 31609А від 15.12.2000.

165. Пастух И. М.Выбор структурной схемы и основных параметров установок для вакуумно-диффузионной газоразрядной обработки металлов. Сборник докладов 5-й Международной конференции «Вакуумные технологии и оборудование», Харьковская научная ассамблея, апрель 2002 г. с. 236-242.

166. Пастух І. М. Методика проектування камер для вакуумно-дифузійних газорозрядних процесів обробки деталей. Вісник ТУП, Хмельницький, 2002, №1. с. 20-38.

167. Пастух І. М. Особливості нормування і економічних показників допоміжних процесів газорозрядної вакуумно-дифузійної обробки деталей. Хмельницький: Вісник ТУП. 2002, №2. С. 339-342.

168. Каплун В. Г., Пастух І. М. Енерго- і ресурсозберігаюча технологія і обладнання для зміцнення поверхні деталей машин.

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
Львів: Машинознавство. 2002, №2. с. 49-51.

169. Пастух І. М., Давидов А. М., Здибель О. С. Електричні параметри вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій модифікації поверхні металів. Хмельницький: Вісник ТУП. 2002, №5. с. 170-175.

170. Пастух И. М. Энергетика процессов вакуумно-диффузионной газоразрядной обработки металлов. Доклады 3-й Международной конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов», Харьков, сентябрь 2002. с. 379-384.

171. Каплун В. Г., Пастух И. М. Повышение эксплуатационных характеристик конструкционных элементов модификацией поверхности в тлеющем разряде. Доповіді 4-го міжнародного симпозиуму по трибофатиці. Тернопіль, вересень 2002. С. 379-384

172. Пастух І. М. Методика обробки даних багатфакторних моделей. Хмельницький: Вісник ТУП, 2002, №6, С. 42-46.

173. Пастух І. М., Здибель О. С. Температура поверхні деталей в процесі вакуумно-дифузійної газорозрядної модифікації металів. Хмельницький: Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2001, №4 С. 52-56.

174. Пастух І. М., Давидов А. М., Здибель О. С., Лотоцька І. А. Діодно-конденсаторна система живлення процесу очищення поверхонь металевих виробів. Патент України № 51901А від 16.12.2002.

175. Пастух І. М., Давидов А. М., Здибель О. С., Лотоцька І. А. Система управління процесом очищення поверхонь металів катодним розпиленням. Патент України № 51903А від 16.12.2002

176 Пастух І. М. Багатопозиційна установка для вакуумно-дифузійної газорозрядної модифікації металів. Патент України № 51904А від 16.12.2002

177. Пастух І. М. Спосіб модифікації поверхні сталевих виробів. Патент України № 51905А від 16.12.2002

178. Пастух І. М. Спосіб вакуумно-дифузійного газорозрядного азотування. Патент України № 51906А від 16.12.2002

179. Пастух І. М. Спосіб очищення поверхні металевих виробів. Патент України № 51908А від 16.12.2002

180. Пастух І. М., Давидов А. М., Здибель О. С., Лотоцька І. А. Блок живлення розрядної камери для модифікації поверхні металів. Патент України № 51909 від 16.12.2002

181. Пастух І. М. Система живлення розрядної камери пульсуючим струмом. Патент України № 51910 від 16.12.2002

182. Пастух І. М. Реальні газорозрядні процеси вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій модифікації поверхні металів.



Хмельницький: Вісник ТУП, , 2003, №1. С. 95-106.

183. Пастух И. М. Азотирование в тлеющем разряде: теория и практика. Сборник докладов 4-го международного симпозиума ОТТОМ-4, Харьков, 2003. С. 241-257.

184. Пастух И. М., Здыбель А. С. Влияние взаиморасположения деталей в садке на равномерность параметров режима вакуумно-диффузионной газоразрядной обработки. Сборник докладов 4-го международного симпозиума ОТТОМ-4, Харьков, 2003. С. 258-261.

185. Пастух И. М. Кинетика процессов в разреженной газовой среде и ее влияние на энергетику разряда. Сборник докладов 6-го международного симпозиума «Вакуумные технологии и оборудование», Харьков, 2003 С. 37-40.

186. Пастух І. М. Взаємозв'язок швидкості електронів з енергетичними характеристиками розряду в газовому середовищі. Хмельницький: Вісник ТУП, , 2003, №4, ч. 2. С. 130-134

187. Пастух І. М. Кінетика прикатодних процесів як фактор формування енергетичного спектру падаючого потоку. Хмельницький: Вісник ТУП, , 2004, №1, ч. 1. С. 53-64.

188. Пастух І. М. Особливості технології моделювання багатofакторних залежностей. Хмельницький: Проблеми трибології, 2004, №1. С. 97-101.

189. Пастух И. М., Андреев А. А., Шулаев В. М Вакуумно-диффузионная обработка поверхности металлов с применением тлеющего и дугового разрядов в газах. Новые процессы термической обработки. Библиотека ОТТОМ, ННЦ ХФТИ, Харьков, 2004 С. 5-57.

190. Пастух И. М. Формирование энергетического спектра падающего потока при азотировании в тлеющем разряде. Сборник докладов 5-го международного симпозиума ОТТОМ-4, Харьков, 2004 С. 154-158.

191. Пастух И. М., Давыдов А. М. Вероятностные характеристики энергетических процессов азотирования в тлеющем разряде. Сборник докладов 5-го международного симпозиума ОТТОМ-4, Харьков, 2004. С. 159-163.

192. Пастух И. М., Здыбель А. С. Дробот О. С. Особенности азотирования в тлеющем разряде с нетипичными параметрами. Сборник докладов 5-го международного симпозиума ОТТОМ-4, Харьков, 2004. С. 164-168.

193. Пастух І. М. Теоретичні положення енергетичного спектру падаючого потоку в газорозрядних дифузійних технологіях. Хмельницький: Вісник ТУП, 2004, №5. С. 19-35.

194. Пастух И. М. Модификация металлов с применением азотирования в тлеющем разряде: состояние и перспективы. Хмельницький: Проблеми трибології, 2004, №3-4. С. 42-55.

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*

195. Пастух І. М., Здибель О. С. Проблематика моделювання процесу азотування в тліючому розряді. Хмельницький: Вісник ХНУ, 2005, №1С. 7-11.

196. Пастух І. М. Модифікація поверхності металів азотированим в тлеючому розряді. Бизнес-мост. Промышленность и технологии, 2005, №1-2. С. 44,47.

197. Пастух І. М., Здибель А. С. Влияние параметров технологического режима азотирования в тлеючому розряді. Сборник докладов 6-й международной конференции ОТТОМ-6, г. Харьков, 2005С. 251-254.

198. Пастух І. М. Алгоритми расчета энергетического спектра падающего потока при азотировании в тлеючому розряді. Сборник докладов 6-й международной конференции ОТТОМ-6, г. Харьков, 2005. С. 255-258.

199. Пастух І. М., Давыдов А. М. Энергетика нейтральных составляющих потока при азотировании в тлеючому розряді. Сборник докладов 6-й международной конференции ОТТОМ-6, г. Харьков, 2005. С. 259-263.

200. Пастух І. М. Енергетичний спектр падаючого потоку при азотуванні в тліючому розряді. Хмельницький: Вісник ХНУ, 2005, №5, ч. 1, т. 1. С. 5-15.

201. Каплун В. Г., Пастух І. М., Давидов А. М., Здибель О. С. Теорія та фізичні основи технологій модифікації поверхні формуванням комбінованих поліфазних плазмово-дифузійних шарівЗвіт по НДР/ Міністерство освіти та науки України, ТУП, шифр 1Б-2000, № держ. рег. 0100U001977, Хмельницький, 2002. 137 с.

202. Пастух І. М. Взаємодія падаючого потоку з поверхнею при модифікації в тліючому розряді. Хмельницький: Вісник ХНУ, 2005, №6, т. 1. С. 185-194.

203. Каплун В. Г., Пастух І. М., Паршенко А. В., Здибель О. С., Машовець Н. С. Теоретичні основи фізики низькотемпературної поверхневої вакуумно-дифузійної газорозрядної модифікації азотоактивних сплавів. Звіт по НДР/ Міністерство освіти та науки України, ТУП, шифр 1Б-2003, № держ. рег. 0103U001203, Хмельницький, 2005. 197 с.

## ГЛАВА 1

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА

## 1.1 Введение в основы процесса

### *1.1.1. Классификация процессов и терминология*

Как отмечалось выше, известно больше сотни методов преобразований металлических изделий, направленных в основном на повышение работоспособности, целью которых является изменение свойств как поверхности, так и всего объема [1]. Азотирование в тлеющем разряде входит в группу технологических процессов, применяемых для изменения свойств поверхностного слоя деталей машин, оснастки и инструмента – ее модификации. Модификация поверхности металлических сплавов, таким образом – комплексное изменение ее структуры, фазового состава и, как следствие, физических, химических, механических характеристик, а также эксплуатационных свойств, возможно также размеров и формы в результате взаимодействия с внешней средой. Понятие модификации более широкое, чем часто применяемые традиционные термины, так как по определению – это видоизменение предмета или явления, характеризующееся появлением у него новых признаков при сохранении сущности. В пользу предлагаемой терминологии говорит следующая аргументация. Применение узких терминов (например – упрочнение) неточно отображает сущность некоторых видов обработки уже потому, что любая обработка практически никогда не дает однозначных результатов, например, при упрочнении за счет повышения твердости почти всегда растет хрупкость и снижается пластичность. Даже такой широко применяемое понятие как «Химико-термическая обработка» не в полной мере можно считать корректным, хотя вряд ли правомерно претендовать на изменение этого стандартизированного термина. Ведь обработка поверхности с использованием некоторых технологий сопровождается процессами образования твердых растворов, диффузией, что уже само по себе не является прерогативой только химии; составляющие адсорбции (сорбции) – физическая и хемосорбция во многих случаях равновероятны и равноправны. Наконец насыщение поверхности из растворов может проходить и при нормальной температуре.

Исследуемая технология реализуется в среде газа пониженного давления при воздействии на газовый промежуток электрического

поля между анодом и катодом, в качестве которого используется поверхность объекта модификации, при этом активные элементы среды внедряются в поверхность, образуя в ней различные соединения и растворы. Для обозначения этого класса технологий использовались, а некоторые используются и до настоящего времени, термины «ионная», «плазменная», «в тлеющем разряде» и т. п. Следует признать, что некоторые из этих терминов не совсем корректно и однозначно отображают суть процесса, ибо ионы являются основным компонентом падающего потока, но, как будет показано ниже, далеко не единственным; главные образующие процессы протекают в катодной области, которую нельзя считать плазмой в классическом понимании этого термина (в ней не выполняется условие квазинейтральности, являющееся ее основополагающим признаком), тлеющий разряд, используемый в названии представляемой работы, наиболее близок к характеру процесса. Таким образом, означенная технология модификации поверхности наиболее точно можно квалифицировать как вакуумно-диффузионную газоразрядную (ВДГРТ). По этой причине в инженерной практике электрический разряд в газе как термин наиболее точно определяет характер процесса, хотя и он нуждается в конкретизации подвида Место ВДГРТ в структуре методов обработки металлов демонстрируется рис. 1.1.

Создание универсальной классификации вряд ли возможно даже для более простых, чем обработка металлов процессов, хотя бы потому, что подобная систематизация информации была бы чрезмерно громоздкой. Поэтому любая классификация прежде всего подчиняется ее целям и задачам, что в основном и в первую очередь предопределяет выбор системы критериев и их иерархию.

Рассматривая модификацию поверхности металлических сплавов в аспекте комплекса изменений ее свойств, целесообразно назначить следующую иерархию уровней выбора параметров, по которым будет обобщаться информация: фазовое состояние среды, содержащей активный элемент модификации; ее состояние; тип процесса модификации; его активатор. Например, среда, окружающая поверхность, может быть жидкой, твердой или газообразной, находиться при этом в нормальных условиях, при повышенных или пониженных параметрах состояния; характер взаимодействия с поверхностью может быть диффузионным, адгезионным; в качестве активатора представляется возможным использовать термическое воздействие, электрический разряд в газе и т.п.

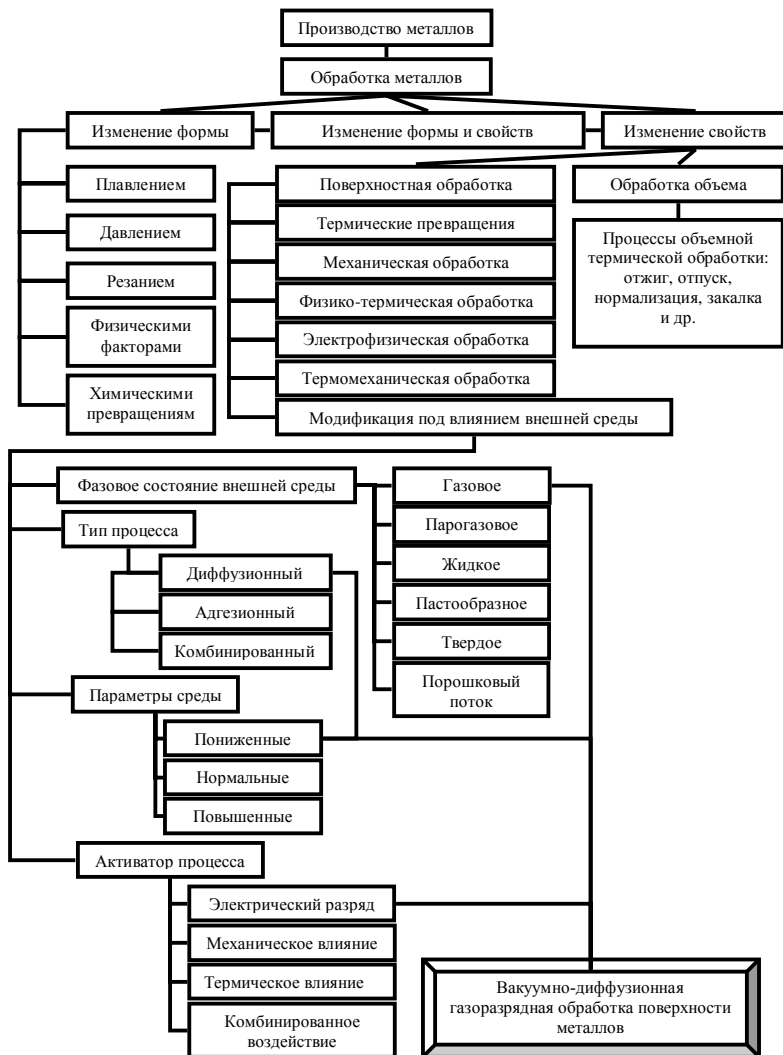
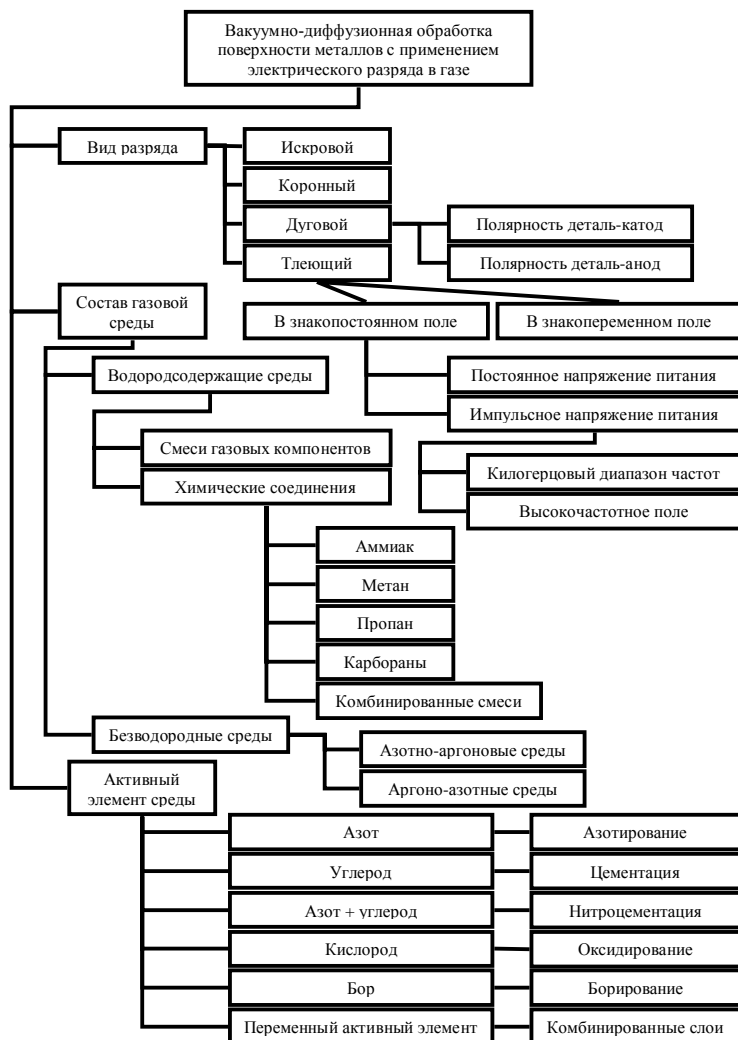


Рис. 1.1. Общая структура системы классификации процессов обработки металлов

Более детальная классификация обработки металлических объектов с применением электрического разряда в газе показана на рис. 1.2.



*Рис. 1.2. Классификация процессов обработки металлов с применением электрического разряда в газе*

Возвращаясь к вопросу о терминологии названия исследуемой технологии, следует напомнить также, что основоположники теории процесса с самого начала называли его *Glimmnitrierung* – азотирование в тлеющем разряде [2-4]. Нельзя не признать, что этот термин наиболее точно отображает суть физики собственно процесса.

Из предложенной на рис. 1.2 схемы следует, что применение различных активных элементов газовой среды в принципе позволяет проводить все основные виды обработки поверхности металлов, включая и создание комбинированных поверхностных слоев. Например, азотирование в тлеющем разряде инструмента, который предназначен для обработки нержавеющей стали, обеспечивает достаточную твердость и износостойкость, однако в целом работоспособность инструмента существенно не повышается ввиду склонности к интенсивному образованию на модифицированной поверхности режущих кромок нароста. Только применение в заключительной фазе обработки в качестве газовой среды окислителя способствует образованию оксидной пленки на поверхности, предотвращающей образование нароста и, таким образом, существенно повышает работоспособность инструмента.

Азотирование в тлеющем разряде (АТР) обладает целым рядом преимуществ в сравнении с газовым, к ним следует отнести прежде всего существенно более низкие показатели расходования энергии, в значительной степени большую энергию частиц, бомбардирующих поверхность, что предопределяет на порядок меньшую продолжительность технологического цикла, управляемость, стабильность и предсказуемость конечных показателей обработки, их равномерность по поверхности ввиду отсутствия взаимного перекрытия участков. Конечно, АТР требует более тщательной подготовки деталей к обработке, о чем будет более подробно рассмотрено в последней главе, сложнее система их подвески или установки в разрядной камере. Управление процессом обязательно должно предусматривать функцию отсечки перехода тлеющего разряда в дуговой, сама разрядная камера изготавливается с более жесткими требованиями к качеству, особенно в части герметичности. Однако отмеченные выше преимущества компенсируют в полной мере и оправдывают это усложнение оборудования.

По принципу действия газовых систем все установки условно можно разделить на аммиачные и безводородные. Таким образом, газовые среды могут быть с водородом или без него, причем водородосодержащие среды в основном применяются с использованием в качестве рабочего газа аммиака, что прежде всего

создает проблемы с точки зрения экологии, а также взрывоопасности. Однако главным недостатком применения водородсодержащих газовых сред является факт водородного охрупчивания, хотя твердость поверхности при прочих равных условиях всегда выше, чем при использовании безводородных газов. Для режущего же инструмента, зубчатых колес, а также пар трения, работающих при значительных напряжениях на поверхности существенным являются не только, а в некоторых случаях даже не столько, высокие показатели твердости поверхностного слоя, но и характеристики пластичности. Хрупкий инструмент не будет работоспособен при малейших динамических нагрузках, а они неизбежны в реальных процессах резания, отсутствие пластичных свойств у корня зуба приводит к поломке зубчатых колес, а скалывание с поверхности, подвергнутой значительным контактным напряжениям, частичек высокой твердости по существу является процессом образования абразивов, интенсивно разрушающих ее.

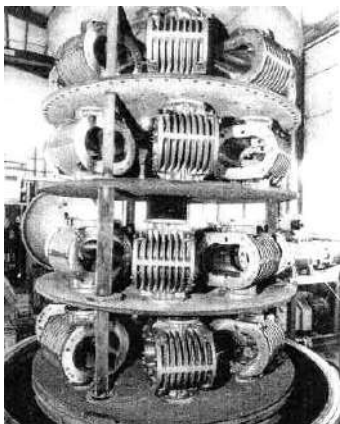
Принцип установок для азотирования в безводородных средах разработан ПНФТЦ ХНУ. При этом дополнительно обеспечиваются следующие преимущества: процесс становится абсолютно экологически чистым; сокращается расход газа, а таким образом и стоимость обработки; упрощается конструкция установок за счет исключения столь сложных в эксплуатации диссоциаторов; поверхностный слой обладает большей пластичностью, что особенно важно для деталей зубчатых передач (снижает концентрацию напряжений у корня зуба), а также для обрабатываемого инструмента, работающего при ударных нагрузках и с вязкими материалами. Весь дальнейший материал изложен в основном применительно к технологическим процессам азотирования в тлеющем разряде с безводородными газовыми средами - безводородному азотированию в тлеющем разряде (БАТР).

В пределах круга вопросов, очерченных темой этой работы, далее будут рассмотрены только процессы обработки с применением тлеющего разрядов. Использование искрового, а тем более – коронного, разрядов не нашли столь широкого промышленного применения в сравнении с тлеющим. Последний может протекать как в знакопеременном, так и преимущественно в знакопостоянном полях, однако сколько-нибудь значительные работы по сопоставлению этих вариантов обработки отсутствуют. Естественно применение знакопеременного поля упрощает структуру и повышает надежность оборудования поскольку из него исключается выпрямитель. Знакопостоянное поле может поддерживаться как от источника постоянного напряжения питания (насколько это постоянство обеспечивается фильтрами питания), так и от источника



импульсного питания. В последнее время варианту импульсного питания (терминологически верно было бы его квалифицировать как циклически коммутируемый разряд (ЦКР), так как даже разряды, обеспечивающие знакопостоянное поле, в принципе в большей или меньшей мере из-за особенностей источника питания являются импульсными) уделяется значительное внимание. Выбор частоты импульсов и их скважности должны подчиняется правилу: продолжительность импульса не может превышать время перехода тлеющего разряда в дуговой, продолжительность паузы должна быть достаточной для гашения разряда. Проведенные исследования по сопоставлению эффективности и технологических преимуществ обработки при постоянном и импульсном напряжениях питания позволяют сделать следующие выводы [5, 6]. Главное преимущество процессов с ЦКР состоит прежде всего в упрощении технологии. Особенно это касается деталей, имеющих на поверхности локальные искления в виде узких глубоких пазов, отверстий малого диаметра, в которых возможен переход тлеющего разряда в дуговой. Не говоря уже о неизбежном в таких случаях местном перегреве поверхности, а соответственно и возможном отпуске в этих зонах, наличие пусть даже локального дугового разряда не позволит дальше проводить процесс. Установлено [5], что если на поверхности имеются отверстия диаметром меньше 8 мм, то импульсное питание более эффективно в сравнении с постоянным, обеспечивая при этом азотирование внутри отверстий, чего не наблюдается при питании постоянным напряжением. Возможное пояснение этого может состоять в эффекте «накачки» ионов активного компонента внутрь отверстия. Действительно из теории разряда с полым катодом, а именно такой схеме соответствуют глубокие отверстия малого диаметра, известно, что на расстоянии от торца отверстия, примерно равном его удвоенному диаметру, напряженность поля практически равна нулю. Поэтому дальше необходимые для модификации поверхности прикатодные процессы в случае питания постоянным напряжением отсутствуют. Если же напряжение циклически прерывается, то часть ионов по инерции продолжают двигаться внутрь отверстия, при этом создавая там их избыточную концентрацию, что и предопределяет протекание модификационных процессов.

Вторым следствием ЦКР является упрощение требований к формированию садки. Детали по существу можно загружать (рис. 1.3., [7]) без соблюдения тех строгостей, которые характерны для питания постоянным напряжением, когда чрезмерное приближение деталей друг к другу или к оснастке равноценно искусственному созданию щелей и пазов со всеми вытекающими



*Рис. 1.3. Пример загрузки  
разрядной камеры*

Однако при азотировании простых поверхностей, на которых отсутствуют сколь-нибудь существенные локальные исключения, более эффективным, несомненно, является электрический разряд с питанием от источника постоянного напряжения [5]. Это вполне объяснимо, поскольку очевидно, что при непрерывном течении разряда суммарная плотность потока частиц на поверхность больше, равно как и большими будут средние значения тока, напряжения и мощности.

### ***1.1.2. Краткий анализ моделей процесса***

Бесспорно, для максимального использования потенциальных возможностей того или другого технологического процесса необходимо наличие его модели, которая бы по возможно наиболее точно отображала реальную сущность явлений. Именно в этом случае создаются условия для прогнозирования результатов обработки деталей, а также оптимизации технологии, в том числе и по фактору энергоемкости. Азотирование в тлеющем разряде относится к технологиям, реализуемым с использованием электрического разряда в газе (ЭРГ) в качестве интенсификатора процесса. В классическом варианте деталь при этом служит катодом. Относительно такого принципа известны несколько теоретических моделей взаимодействия газовой среды с металлической поверхностью, следствием чего и есть создание на поверхности диффузионных азотосодержащих слоев, модифицирующих ее с целью изменения свойств.

Первые отечественные теоретические и экспериментальные исследования процессов обработки в тлеющем разряде относятся к 60 - м годам, тогда же, собственно, и началось промышленное внедрение технологии. Наиболее существенные результаты были получены научными школами под руководством Ю. М. Лахтина (МАДИ) и Б. Н. Арзамасова (МВТУ им Н. Э. Баумана) [8-15].

Естественно, в первую очередь исследования касались

изучения природы и параметров тлеющего разряда применительно к технологическому процессу модификации поверхности, их влияния на конечные результаты. Тогда же были проведены исследования по составу газовой среды в прикатодном пространстве, которые позволили сделать принципиально важный вывод о роли атомарных ионов активного компонента. В целом было доказано, что азотирование в тлеющем разряде по качеству и другим свойствам модифицированного слоя не хуже газового азотирования при существенно меньшей (иногда на порядок) продолжительности и значительной экономии энергоресурсов.

В Украине наиболее весомые исследования технологий модификации поверхности металлов в тлеющем разряде были проведены, начиная с 1975 года, в Хмельницком национальном университете под руководством Каплуна В. Г. [16]. Эти исследования преимущественно касались технологии и оборудования для азотирования в тлеющем разряде с применением безводородных газовых сред. Наряду с разработкой технологических процессов была спроектирована и выпускалась небольшими сериями гамма оборудования для реализации безводородного азотирования в тлеющем разряде.

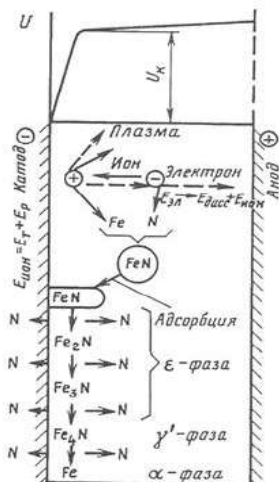


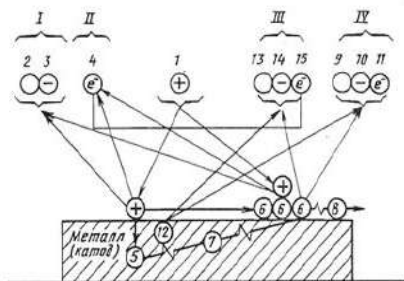
Рис. 1.4. Схема взаимодействия плазмы с поверхностью катода при АТР

Теоретические положения процесса к настоящему времени характеризуются двумя основными подходами. Первый из них сформирован солидарно учеными школы Лахтина Ю. М. и немецкой школы [17-19]. Суть этой модели демонстрируется рис. 1.4 [8, 11, 19], который стал уже классикой теории азотирования в тлеющем разряде.

Исходной посылкой данной модели является предположение о том, что атомы железа в плазме тлеющего разряда соединяются с азотом, образуя при этом нитриды железа. Они в свою очередь под воздействием направленной бомбардировки заряженными частицами двигаются в направлении катода, адсорбируются поверхностью. Затем уже на поверхности под действием бомбардировки поверхности падающим потоком нитриды

преобразуются, постепенно превращаясь из  $\epsilon$ -фазы в  $\gamma'$ -фазу, высвободившийся при этом атомарный азот образует твердый раствор  $\alpha$ -фазы, диффундируя вглубь поверхности. Таким образом, азот поступает в поверхность не только из газовой фазы, но и в результате преобразования нитридов, а движущей силой процесса является высокий градиент концентрации азота.

В 1986 г. на 5-м конгрессе МОТО в Будапеште эта модель была подвергнута критике Арзамасовым Б. Н. [13, 15]. Им сформулирован



*Рис. 1.5. Схема процесса взаимодействия атомных частиц с металлом в вакууме*

иной принцип процесса, который демонстрируется рис. 1.5 [15]. Согласно этой гипотетической (по выражению автора) схеме ведущую роль в процессе азотирования в тлеющем разряде играют атомарные ионы азота, которые были обнаружены в прикатодных слоях газовой среды (справедливости ради следует заметить, что по методике исследования

ионного состава прикатодной плазмы, описанной в [15] по существу речь идет о «закатодной» плазме, наиболее интересные с точки зрения влияния на процессы модификации данные в слое на границе газ-металл таким образом получить нельзя). Интенсивность процесса определяется именно количеством атомарных ионов азота. В результате бомбардировки поверхности может происходить ее распыление как в виде нейтральных частиц металла, так и его отрицательных ионов совместно с электронами. В то же время на поверхности формируется слой адсорбированных частиц азота как следствие направленного движения частиц в поле, рекомбинации ионов непосредственно на поверхности, а также выхода некоторых частиц, уже внедрившихся в поверхность, на границу газ-металл. Под воздействием падающего потока частицы адсорбированного слоя могут распыляться или внедряться в поверхность, создавая твердый раствор.

Таким образом, принципиально важным отличием между изложенными подходами является прежде всего вопрос о первичности образования в поверхностных слоях металла нитридов или твердого раствора. Согласно первой модели сначала образуются нитриды, следствием преобразования которых и будет образование

твердого раствора. По второй же модели избыточная концентрация азота в твердом растворе в совокупности с энергетическим влиянием падающего потока способствует химическим преобразованиям.

Не вдаваясь в более глубокий анализ изложенных моделей, нельзя, однако, не отметить следующее. Для того, что бы имело место образование нитридов непосредственно в газовой среде по первой модели, нужно располагать достаточной концентрацией атомарного азота в ней. Этот компонент может быть получен или в результате рекомбинации молекулярных ионов, которая всегда имеет диссоциативный характер [20], или как следствие диссоциации молекул азота электронным ударом. Первый вариант маловероятен, так как сечение диссоциативной рекомбинации примерно на шесть - десять порядков меньше сечения ударной ионизации. Если учесть, что степень ионизации в плазме применительно к условиям рассматриваемых процессов очень низкая, порядка  $10^{-7}$ , рекомбинация молекулярных ионов не может служить источником атомарных ионов. По второму варианту сечение диссоциации молекул азота составляет примерно 25-30% от сечения ионизации электронным ударом, как основного фактора ионизационных явлений в прикатодном пространстве [20, 21]. Примерно такое же соотношение между количеством атомарных и молекулярных ионов установлено и Арзамасовым Б. Н. [15]. Однако окончательный вывод о правомочности гипотезы об образовании нитридов непосредственно в газовой среде можно сделать только с учетом расчета вероятности комплекса процессов: распыление металла - образование атомарного активного элемента – их совместное столкновение при уровнях энергии столкновений в диапазоне, приемлемом для химической реакции образования соединений.

Как бы существенно не отличались обе модели, в них есть одно общее условие: обе модели основаны на движении положительных ионов в естественном направлении от анода к катоду. Таким образом, и в первой, и во второй модели образующим началом является бомбардировка поверхности металла положительными ионами активного компонента. Это предполагает только один вариант полярности: деталь может служить только катодом. Однако исследованиями, выполненными в ННЦ «Харьковский физико-технический институт» Андреевым А. А. [22] установлено, что практически одинаковые результаты азотирования в дуговом разряде (по сути межэлектродных процессов он ничем не отличается от тлеющего разряда, основная разница состоит только в том, что в тлеющем разряде главным источником электронного потока с катода есть вторичная ионно-электронная эмиссия, а в дуговом –

термоэлектронная эмиссия [23]) получены как при отрицательной полярности (деталь-катод), так и при положительной (деталь-анод). Известны также результаты исследований, в которых пусть и осторожно, но обращается внимание на необязательность получения азотированных поверхностных слоев при обработке в тлеющем разряде за счет энергии ионов [24]. Авторами работы были проведены эксперименты на установке азотирования в тлеющем разряде, в которой анод подогревался специальным устройством, причем его система управления автоматически поддерживала температуру анода в точности равную текущей температуре катода. В результате было установлено, что при тлеющем разряде в атмосфере аммиака возможно насыщение поверхности нагретого анода, причем скорости образования азотированных слоев на аноде и катоде приблизительно одинаковы, а изменение твердости по глубине слоя от поверхности до сердцевины у анода более плавное, чем на катоде, равно как и глубина слоя на аноде даже больше. Дальше авторы делают вывод, согласно которому сопоставимые скорости одновременного азотирования в тлеющем разряде обоих электродов свидетельствует о том, что значительно большая скорость азотирования в тлеющем разряде в сравнении с печным азотированием по крайней мере не во всех случаях обусловлена влиянием на обрабатываемую поверхность потока ускоренных положительных ионов, которым обычно объясняют это явление [25, 26].

Факт азотирования при положительной полярности отрицает механизм образования нитридов в газовой среде, так как поверхность, бомбардируемая электронами, не распыляется. Тогда вполне вероятен вывод, что источником активного элемента, диффундирующего в поверхность, может служить слой его, адсорбированный на поверхности непосредственно из газовой среды (в общем случае – это нейтральные частицы с учетом безразличия к полярности). Под воздействием падающего потока – ионов при отрицательной полярности или электронов при положительной полярности - адсорбированные молекулы диссоциируют, атомарные компоненты в зависимости от их энергии образуют твердый раствор или химические соединения с компонентами поверхности. При этом следует иметь в виду, что молекула, связанная в большей или меньшей степени с поверхностью, диссоциирует при меньшей энергии соударения, чем находящаяся свободно в газе. Из теории термодинамических систем известно, что в каждой конкретной ситуации в первую очередь идет та реакция, которая энергетически наиболее выгодна. Поэтому не исключено, что в реальности имеют место процессы, характерные как для первой, так и для второй

моделей, хотя Б. Н. Арзамасов с подобным компромиссом категорически не согласен [15].

В связи с тем, что дуговой и тлеющий разряд имеют принципиальное отличие один от другого, состоящее в степени ионизации газового промежутка, а также в том, что в дуговом разряде основным источником электронов есть терморadiационная, а в тлеющем – ионно-электронная эмиссии, нами проведены экспериментальные исследования возможности азотирования в тлеющем разряде при обратной полярности, т.е. деталь была анодом. Схема опыта показана на рис. 1.6. Корпус камеры 1 служит катодом, внутри которого размещена подвеска анода 2, к ней подвешено кольцо 3. В кольцо на резьбе равномерно по кругу устанавливаются образцы из разных сталей 4. С

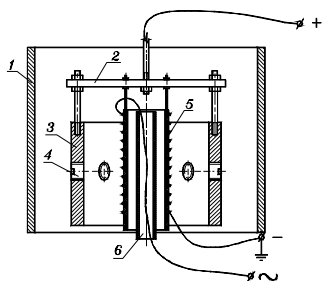


Рис. 1.6. Схема опыта для азотирования в тлеющем разряде с обратной полярностью (деталь – анод)

внутренней стороны кольцо нагревается спиральным нагревателем на керамической трубке 5 с выводом одного из концов нихромовой обмотки через центральную керамическую трубку 6. Температура процесса измерялась терморadiационным пирометром с поверхности излучения с поверхности кольца. В связи с тем, что поверхность катода не была полностью покрыта плазмой (плотность тока разряда рассчитывалась по

величине поверхности кольца) разряд по типу квалифицируется как нормальный тлеющий.

Образцы из разных сталей обрабатывались по режимам, описание которых приведено в табл. 1.1. Во всех экспериментах применялась газовая среда N75Ar25 (здесь и далее с целью сокращения применяется условное обозначение газовых сред по схеме: N75Ar25 - содержание азота по объему 75%, аргона - 25%). Результаты измерения поверхностной микротвердости  $HV_{0,1}$  до и после обработки приведены в табл. 1.2 (данные после обработки: в числителе – для внешней поверхности кольца 3, в знаменателе – для внутренней). С табл. 1.2 следует, что азотирование в тлеющем разряде с обратной полярностью принципиально возможно для всех сталей, некоторые проблемы возникают для хромистых сталей. Плохая восприимчивость хромистых сталей к азотированию по той же схеме наблюдалась и в дуговом разряде [22].

Таблица 1.1  
**Технологические режимы азотирования с обратной полярностью**

№	Характеристика режима
1	Очистка катодной бомбардировкой при давлении 0,01 тора и напряжении 1100 В, давление газа 0,4 тора, температура детали 560°С, время азотирования 360 минут, плотность тока 11,7 А/м <sup>2</sup> , межэлектродный потенциал 335 В
2	Аналогично режиму 1, но очистке предшествовал предварительный нагрев до температуры 400°С
3	Аналогично режиму 1, но рабочее давление 0,9 тора, плотность тока 31,9 А/м <sup>2</sup>
4	Аналогично режиму 1, но очистке предшествовал нагрев до температуры 500°С, рабочее давление 0,9 тора, плотность тока 31,9 А/м <sup>2</sup>
5	Аналогично режиму 1, давление 2 тора, межэлектродный потенциал 340-350 В, плотность тока 46,8 А/м <sup>2</sup>
6	Аналогично режиму 1, давление 0,9 тора, межэлектродный потенциал 330-360 В, плотность тока 37,2-42,6 А/м <sup>2</sup>
7	Аналогично режиму 1, давление 0,4 тора, межэлектродный потенциал 330-380 В, плотность тока 31,9-37,2 А/м <sup>2</sup>

Причина подобных исключений возможно кроется в разных значениях энергетических уровней взаимодействия азота с поверхностями, которые содержат хром и без него. Отсутствие азотирования на внутренней стороне кольца вероятно вызвано очень малым потоком электронов, которые вылетают на этой стороне с катода - спирали нагревателя, ввиду очень малого отношения площади провода нагревателя к площади кольца-анода. Снижение микротвердости на внешней поверхности кольца для хромистых сталей может быть обосновано также снижением содержания углерода в поверхности без компенсации увеличения твердости за счет насыщения поверхности азотом. Тезис о снижении содержания углерода подтверждается тем фактом, что в случае использования катодной бомбардировки нагретой до высокой температуре детали поверхностная микротвердость снижается (режимы 2 и 4), особенно в том случае, если последующее азотирование не дало результатов



или они несущественны.

Далее из приведенных данных следует, что при низком давлении или малой плотности тока интенсивность азотирования резко снижается. Это в свою очередь приводит к выводу о возможном механизме азотирования, основные положения которого сводятся к следующему: на поверхности детали образуется слой адсорбированных частиц газа; бомбардировка этого слоя энергичными частицами повышает энергетический уровень частиц на поверхности до значений, достаточных как для образования нитридных соединений, так и для внедрения их в поверхность.

Таблица 1.2

**Параметры поверхностной микротвердости после обработки с обратной полярностью**

Сталь	До обработки	После обработки по режиму №						
		1	2	3	4	5	6	7
20	250	$\frac{260}{260}$	$\frac{250}{255}$	$\frac{620}{260}$	$\frac{255}{255}$	$\frac{245}{270}$	$\frac{590}{265}$	$\frac{650}{230}$
45	230	$\frac{235}{230}$	$\frac{230}{230}$	$\frac{650}{240}$	$\frac{260}{205}$	$\frac{220}{235}$	$\frac{450}{220}$	$\frac{450}{190}$
В7	250	$\frac{245}{250}$	$\frac{250}{250}$	$\frac{500}{225}$	$\frac{265}{220}$	$\frac{230}{215}$	$\frac{550}{195}$	$\frac{500}{190}$
12ХН3А	250	$\frac{225}{250}$	$\frac{230}{205}$	$\frac{250}{300}$	$\frac{220}{230}$	$\frac{240}{340}$	$\frac{400}{290}$	$\frac{245}{250}$
25Х12Ф2	220	$\frac{210}{210}$	$\frac{205}{200}$	$\frac{210}{210}$	$\frac{190}{205}$	$\frac{200}{195}$	$\frac{205}{220}$	$\frac{195}{195}$
40ХФ	250	$\frac{220}{250}$	$\frac{245}{235}$	$\frac{215}{280}$	$\frac{230}{250}$	$\frac{230}{350}$	$\frac{610}{300}$	$\frac{400}{255}$
Х12Ф1	300	$\frac{255}{330}$	$\frac{235}{260}$	$\frac{320}{460}$	$\frac{275}{290}$	$\frac{260}{310}$	$\frac{670}{610}$	$\frac{260}{260}$
45	240	-	-	$\frac{590}{240}$	-	-	-	-

--	--	--	--	--	--	--	--	--

Влияние плотности тока на интенсивность азотирования в первую очередь может быть объяснено тем, что соответственно соотношению масс электрона и частицы газа при каждом столкновении частица на поверхности передается очень малая доза энергии. Для того чтобы ее энергетический уровень повышался как результат накопления энергии, нужно обеспечить частоту ударов, при которой период между столкновениями был бы меньше времени диссипации энергии. Действительно, в опытах с азотированием в дуговом разряде, которые упоминались выше, плотность тока достигала значений  $5000 \dots 10000 \text{ A/m}^2$ , поэтому результаты азотирования при обычной и обратной полярности практически ничем не отличались ни по твердости, ни по ее распределению по глубине слоя. Другим фактором, влияющим на интенсивность процесса азотирования при обратной полярности, есть давление газа, а с ним, по всей видимости, связанные адсорбционные явления. Как будет показано дальше, относительно энергетических параметров АТР, подтверждается вывод о наличии оптимума давления, которое отвечает значениям в пределах  $0,8 \dots 1$  тор. Именно при этом давлении были получены наилучшие результаты азотирования (режимы 3 и 6), а в комбинации с повышенной плотностью тока самым оптимальным практически для всех сталей (за исключением некоторых хромистых) оказался режим № 6.

Результаты анализа фазового состава поверхности для разных сталей, обработанных по режиму № 3, приведены в табл. 1.3. Эти данные полностью подтверждают факт азотирования некоторых сталей в тлеющем разряде при обратной полярности с образованием слоев, фазовый состав которых характерен для этого процесса.

Исходной точкой модели АТР по Лахтину Ю. М. есть образование в газе нитридных соединений на базе распыленных частиц металла, но даже сама физическая возможность подобного

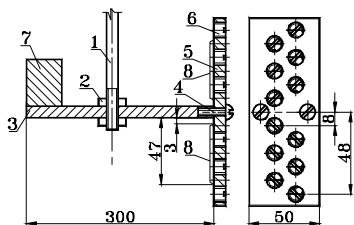


Рис. 1.7. Схема приспособления для исследования распыления поверхности

процесса не допускалась критиками модели. Однако наличие в газовой среде, в том числе и на значительном расстоянии от поверхности, довольно высокой концентрации распыленного металла поверхности подтверждается следующим экспериментом, схема которого показана на рис. 1.7. Известно, что АТР титановых

сплавов требует оснащения установок подвесками также изготовленными из титана. Несоблюдение этого правила делает невозможным азотирование титановых деталей в связи с тем, что распыленное железо блокирует образование соединений азота с титаном на поверхности и диффузию азота в глубину слоя.

Таблица 1.3

**Фазовый состав поверхностных слоев, сформированных азотированием при обратной полярности**

<b>Сталь</b>	<b>Характеристики слоя</b>
<b>20</b>	На внешней стороне слой $Fe_3N$ толщиной 4,5...5... ..5,4 мкм, объемная доля 43,7%, параметры решетки $a=3,80969$ ; на внутренней стороне – слой шириной 40...44 мкм обезуглероженного металла
<b>45</b>	На внешней стороне слой $Fe_4N$ толщиной 4,5...5... ..5 мкм, объемная доля 36,1%, параметры решетки $a=2,869$ ; на внутренней стороне – слой шириной 12...14 мкм обезуглероженного металла
<b>В7</b>	На внешней стороне слой $Fe_4N$ толщиной 7...8 мкм, объемная доля 45,1%, параметры решетки $a=3,80855$ ; на внутренней стороне – слой шириной 21...32 мкм обезуглероженного металла
<b>25X12Ф</b>	На внешней стороне – нет слоя; на внутренней стороне – слой шириной 4...5...5 мкм обезуглероженного металла, островками
<b>40X</b>	На внешней стороне очень узкий слой $Fe_4N$ толщиной 1,2...2 мкм, на внутренней стороне – слой шириной до 22 мкм обезуглероженного металла
<b>12ХН3А</b>	Нет слоя
<b>X12Ф1</b>	Нет слоя

Следует также обратить внимание на то, что характер обезуглероживания поверхности отличается от результатов, полученных, например, только при термическом воздействии на поверхность. Это можно объяснить тем, что при бомбардировке поверхности падающим потоком часть углерода проникает на большую глубину, где и наблюдается рост его концентрации при снижении ее на поверхности.

На тяге токоввода катода 1 (рис. 1.7) с помощью двух гаек 2

прикреплена пластина 3, к которой с помощью винтов 4 присоединенная пластина 5. В пластину 5 с шагом 8 мм ввинчены образцы 6 диаметром 8 мм. Противовес 7 балансирует приспособление во избежание изгиба тяги при высокой температуре. Отличительная особенность эксперимента заключается в том, что тяга, гайки, пластина 3 и противовес - стальные, а пластина 5 и образцы 6 - с титана. Приспособление размещалось в разрядной камере как катод и азотировалось в тлеющем разряде с предварительной катодной очисткой.

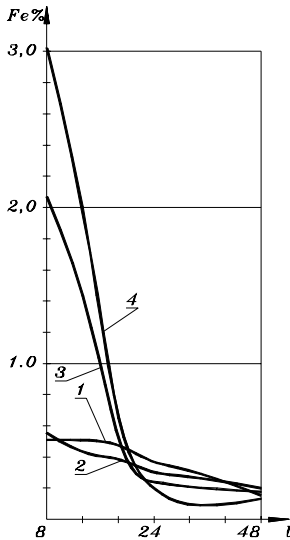


Рис. 1.8. Содержание железа на поверхности титана в зависимости от расстояние до поверхности стальной пластины, мм, 1, 3- ниже стальной пластины, 2, 4- аналогично ниже, 1,2 - газ N75Ar25, 3,4 - газ Ar100

Температура в камере 660 °С, давление 1,2 тора, выдержка 390 минут, газовая среда N75Ar25, межэлектродный потенциал 600...650В, плотность тока 15 А/м<sup>2</sup>. После азотирования на поверхности титановой пластины со стороны стальных деталей выявлен слой 8 темного цвета, причем его наибольшее отдаление от поверхности стальной детали составляет 47...52 мм. С противоположной стороны титановой пластины подобного слоя нет. При исходной поверхностной микротвердости HV<sub>0,1</sub>=230 наблюдается некоторый эффект азотирования с увеличением поверхностной микротвердости на внутренней стороне HV<sub>0,1</sub>=270...323, на внешний HV<sub>0,1</sub>=275...280..... Настолько незначительное увеличение микротвердости связано со сравнительно низкой как для титана температурой процесса. Что касается темного поверхностного слоя, то анализ его химического состава показал, что он включает железо, причем процентное содержание его в слое соответствует рис. 1.8.

Из приведенных на рис. 1.8 графиков следует, что распыленный металл в газовой среде есть, причем на значительном отдалении от поверхности, которая распыляется. Последнее

объясняется тем, что частица, которая вылетела с поверхности, обладает существенно большей массой в сравнении с частицами газа, поэтому двигается в газе, медленно растрачивая начальную энергию при столкновениях, дрейфуя при этом благодаря потоку заряженных частиц к поверхности титановой пластины. Именно благодаря тому, что частицы аргона, которые имеют большую массу сравнительно с азотом и лучше распыляют поверхность, концентрация железа на поверхности для среды Ar100 (содержание аргона 100%) значительно выше, чем для среды N75Ar25. Но и размеры частиц аргона больше, чем азота, поэтому они чаще вступают в столкновения с частицами железа, причем соотношение масс аргона и железа больше, чем для пары азот - железо. Этим и объясняется, что частицы железа в аргоновой среде быстрее теряют энергию, которую они имели при вылете с поверхности, поэтому концентрация железа на поверхности титановой пластины резко уменьшается с отдалением от стальной пластины. Естественно, чем дальше от стальной пластины, тем меньше частиц распыленного металла, этим и объясняется постепенное уменьшение концентрации железа на титановой поверхности.

Очевидно, что теория процессов модификации с применением электрического разряда в газе нуждается в дальнейшей разработке. Из отмеченного выше следуют выводы.

1. Необходимы дальнейшие исследования модели процесса азотирования в тлеющем разряде, так как ни одна из известных моделей не может объяснить, например, факт азотирования при обратной полярности.

2. Основной принцип модели АТР очевидно должен иметь энергетическую основу, так как известно, что в любой термодинамической системе в первую очередь проходят те процессы, которые энергетически наиболее выгодны.

3. Положительные ионы, равно как и быстрые нейтральные частицы, которые бомбардируют поверхность, как существенный фактор АТР прежде всего являются носителями энергии.

4. Аналогичную роль могут играть и другие заряженные частицы, например электроны, а их значительно меньшая масса в процессах энергопередачи может компенсироваться частотой ударов по частицам газа, адсорбированным поверхностью, или частицам самой поверхности.

5. Роль атомарного азота нуждается в дальнейшем уточнении, поскольку при АТР с обратной полярностью (деталь - анод) атомарный азот возле поверхности наиболее вероятно отсутствует (без учета незначительной диффузии в направлении, противоположном потоку ионов). Этот тезис объясняется тем, что

атомарный азот может образовываться за счет рекомбинации молекулярных ионов (в слабоионизированной плазме вероятность этого элементарного процесса чрезвычайно мала) или диссоциации электронным ударом (этот процесс возможен при уровнях энергии, которую электроны в окрестностях анода не могут иметь).

6. Вероятно азотирование в тлеющем разряде является следствием множества элементарных процессов, причем в каждой конкретной ситуации скорость некоторого элементарного процесса определяется распределением энергетического спектра падающего потока.

7. Безусловно очевидная роль положительных ионов как интенсификатора процесса объясняется тем, что они не только обеспечивают большую энергопередачу при столкновении газовых компонентов с поверхностью, но и доставку дополнительно к адсорбированным поверхностью частицам газа высокоактивных элементов, которые модифицируют поверхность.

8. Вероятно при формировании модели нельзя игнорировать и процессы взаимодействия газа с распыленными частицами поверхности, учитывая их наличие в приповерхностной области, в том числе и на значительном удалении от самой поверхности.

9. Важным фактором процесса азотирования в тлеющем разряде вероятно следует считать адсорбционные явления, поскольку находясь неподвижно на поверхности адсорбат при столкновении с частицами падающего потока в большей мере склонен к высоким уровням энергопередачи, образованию нитридов и внедрению в поверхность.

## **ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК**

1. Термическая обработка в машиностроении: Справочник/Под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта.- М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.

2. Kolbel J. Die Nitridschichtbildung bei der Glimmnitrierung, Forsch. Ber. d. Land. NRW Nr 1555, (1965)

3. Keller K. Schichtaufbau glimmnitrierten Eisenwerkstoffe // Harterei Technische Mitteilung. 1971. Bd. 26, №2. S. 120-128.

4. Edenhofer B. Bewley T. J. Heat Treatment, 1976, Metal Soc., London, 7-13 (1978)

5. S. C. Kwon, G. H. Lee, M. C. Yoo A comparative study between pulsed and D. C. ion nitriding behavior in specimens with blind holes. Proceedings of a International Conference of Ion Nitriding, 1986: Cleveland, Ohio.

6. Grun R. Industrial advances for plasma nitriding. Proceedings of a International Conference of Ion Nitriding & Carburizing, 1989:

Cincinnati, Ohio.

7. Renges W., Luhr J. Plasma (Ion) nitriding and plasma (Ion) nitrocarburizing units, application and experiences. Proceedings of a International Conference of Ion Nitriding & Carburizing, 1989: Cincinnati, Ohio.

8. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Азотирование стали. М.: Машиностроение, 1976. 256 с.

9. Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах. М.: Машиностроение, 1979. 224 с.

10. Бабад-Захряпин А. А., Кузнецов Г. Д. Химико-термическая обработка в тлеющем разряде. М.: Атомиздат, 1975. 175 с.

11. Лахтин Ю. М., Крымский Ю. Н. Физические процессы при ионном азотировании// В кн.: Защитные покрытия на металлах, Киев: Наукова думка, 1968. Вып. 2. С. 225-229.

12. Михайлов И. А. Ионные соотношения при разрядном азотировании// МиТОМ, 1965. №10. С. 50-51.

13. Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка сплавов в активизированных газовых средах. Вестник машиностроения, 1986. №9. С. 49-53.

14. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Шпис Г-Й., Бемер З. Теория и технология азотирования. М.: Metallurgiya. 1991. 320 с.

15. Ионная химико-термическая обработка сплавов/Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти.- М.: Изд-во МГТУ им Баумана, 1999.- 400 с.

16. Каплун В. Г. Научные основы технологии упрочнения деталей машин и инструмента ионным азотированием в безводородных средах: Диссертация на соиск. уч. ст. докт. техн. наук.- 1991.- 398 с.

17. Kolbel J. Die Nitridschichtbildung beider Glimmnitrierung//Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. 1965. №1555. S. 1-19.

18. Keller K. Jonnitriren steuerbare Oberflächenverfestigung durch Jonnitriren//Technische Rundschau. 1971. Bd. 63. № 37, S. 33-39.

19. Edenhofer B. Physikalische und metallkundliche Vorgänge beim Nitriren in Plasma einer Glimmentladung// Harterei-Technische Mitteilungen. 1974. Bd. 29. №2. S. 105-112.

20. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992. – 535 с.

21. Мирдель Г. Электрофизика/ Пер. с нем. по ред. В.И. Раховского. – М.: Мир, 1972. – С. 191.

22. Андреев А. А., Кунченко В. В., Саблев Л. П., Шулаев В. М. Дуплексная обработка инструментальных сталей в вакууме//

Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении: Сб. докл. второго Международного симпозиума ОТТОМ-2. Харьков, 2001. С. 48-56.

23. Пастух І. М. Алгоритми та компоненти моделювання газорозрядних процесів вакуумно-дифузійних технологій. – Хмельницький: Вісник технологічного університету Поділля; - 2001; - №5, С. 99-107.

24. Крейндель Ю. Е., Пономарева Л. П., Пономарев В. П., Слосман А. И. Об азотировании анода в тлеющем разряде. Электронная обработка материалов, 1984, №4. С. 32-34.

25. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Регулируемые процессы азотирования. – Металловедение и термическая обработка металлов, 1978, №8, с. 12-15.

26. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Шапошников В. Н. Исследование процесса азотирования стали в тлеющем разряде. – Электронная обработка материалов, 1976, № 5, с. 15-18.



## 1.2 Теоретические исследования процесса

### 1.2.1. Общие теоретические положения

Технологический комплекс включает несколько компонент, которые обеспечивают его промышленное применение. К ним прежде всего относятся технологический режим обработки, оборудование для реализации технологии, организационно-экономические мероприятия и предпосылки.

Существует несколько моделей технологии АТР. Хронологически раньше всех была разработана экспериментально-технологическая модель, в основном благодаря трудам школ Лахтина Ю. М. и Арзамасова Б. Н. Фактически эта модель представляет собой базу данных, полученных путем технологических проб. Эти данные могут оптимизироваться по тем или иным критериям, однако самым существенным недостатком подобного метода является ее слабая приспособленность к проектированию технологий, которые обеспечивали бы требуемые конечные результаты при переменных исходных условиях: материале объектов модификации, их предыдущей химико-термической обработке, эксплуатационным требованиям. Кроме того, этот метод достаточно дорогой и трудоемкий.

Известна модель, которую условно можно квалифицировать как термодинамическую [1]. Она описывает процесс в самих общих параметрах, более пригодна для анализа его энергетических характеристик, практически не связывает условия обработки с конечными результатами.

С учетом отмеченных недостатков представляется наиболее перспективной с точки зрения управляемости процесса обработки модель, которая условно может быть названа мультипроцессной, так как в ней учитываются наиболее существенные по влиянию элементарные подпроцессы, имеющие место в области катодного падения (ОКП) электрического разряда в газе (ЭРГ) [2, 3].

В исследуемой технологии оперируют комплексом, в состав которого входят газовая среда (газ) и поверхностный слой металла (поверхность), причем основные процессы имеют место в зоне газа, которая непосредственно граничит с поверхностью и границы которой могут достигать нескольких сотен длин свободного пробега, и в слое поверхности, также граничащей с газом и имеющей толщину в несколько тысяч атомных слоев [4]. Однако наиболее значимые процессы проходят, как это будет показано ниже в значительно более узких зонах газа и поверхности. Стимулирование процесса модификации поверхности достигается за счет перевода

газа в ионизированное состояние, для чего газ находится между двумя электродами, к которым приложено напряжение от источника чаще всего постоянного или знакопостоянного переменного токов (частота тока не больше нескольких сотен Гц, если отвлечься от формы сигнала, практически ничего не меняет в сравнении с постоянным), причем катодом служит поверхность. В зависимости от свойств газового промежутка возникает ЭРГ того или иного типа, но для исследуемой технологии используется аномальный тлеющий разряд (ТЭРГ). Именно по этой причине установки для АТР должны иметь надежную систему идентификации и отсечки перехода тлеющего разряд в дуговой. Основное отличие ТЭРГ для ВДГРТ от классического, широко используемого в лабораторной практике физики ЭРГ, состоит прежде всего в существенно больших размерах разрядных камер, большом радиусе анода, переменной, а в принципе произвольной форме катода, отсутствии электронной траекторной конструкции, что в дополнении к замкнуто-охватывающей схемой анод-катод по существу делает невозможной амбипольную диффузию, нейтрализацию заряженных частиц на стенках и т. п.

Газ находится в частично ионизированном состоянии, поэтому в нем можно выделить электронную, ионную и атомно-молекулярную компоненты. Реальные параметры ВДГРТ (давление, напряжение, температура, плотность тока) характеризуют плазму как неуровновешенную низкотемпературную. Неуровновешенность плазмы вызвана значительным отрывом электронной температуры  $T_e$  от температуры  $T$  атомно-молекулярной компоненты (теоретически возможны энергетические уровни  $T_e$ , превышающие 1000 эВ, что эквивалентно температуре  $10^7$  К, тогда как температура газа меньше  $10^3$  К).

По технологическим признакам газовая среда может состоять из компонентов двух видов: диффундирующего (для сокращения условно назовем его диффузантом), который, проникая внутрь поверхности, вступает в химическое или иное взаимодействие с компонентами поверхности, создает при этом диффундиды или твердые растворы; и корректирующий элемент (корректор), химически нейтральный или такой, который в условиях конкретных параметров процесса является пассивным или малоактивным относительно поверхности, но способен влиять на динамику электрического разряда, например, за счет изменения константы скорости ионизации и т. п. Обозначим эти компоненты соответственно  $D$  и  $K$ . С точки зрения классификации состава частиц выделим и обозначим: электроны  $-e$ , частицы в атомарном состоянии  $-A$ , в молекулярном  $-M$ , атомарные и молекулярные

положительные однозарядный ионы  $A^+$ ,  $M^+$ . Если тип компонента среды не имеет значения, он будет обозначен индексом  $W$ .

Реально в заметных количествах в катодной области газового промежутка присутствуют молекулы и атомы в нейтральном или возбужденном состоянии, положительные однозарядные молекулярные и атомарные ионы, электроны.[1]. Кроме того, в результате резонансной перезарядки в состав падающего на катод потока входят быстрые молекулы и атомы. Маловероятными можно считать появление многозарядных и отрицательных ионов ввиду отсутствия энергетических и статистических условий для образования первых и компонентов, способствующих прилипанию, для других. С учетом изложенного общая схема процессов, проходящих в катодной области показана на рис. 1.9. Поэтому далее учтены только следующие процессы: возбуждение и дезактивация частиц



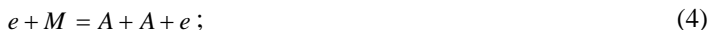
ступенчатая ионизация



ударная ионизация



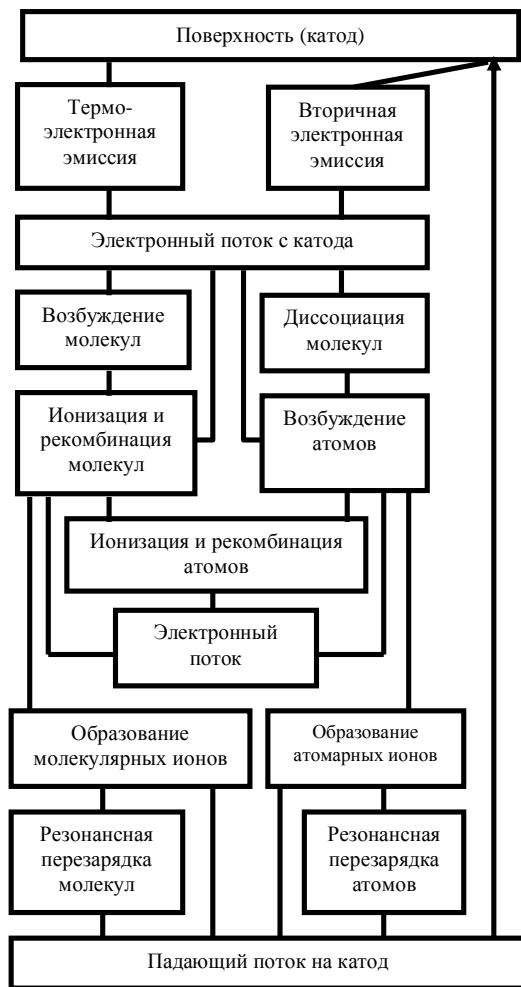
диссоциация



резонансная перезарядка



Установлено, что скорость образования диффундидов, предопределяющая в большинстве случаев эффективность процесса модификации поверхности, зависит от концентрации атомарных ионов основного диффузанта [1]. Только в случаях, когда обрабатываются материалы, обладающие повышенной активностью к диффузantu, образуя с ним диффунди́ды, которые могут создавать на поверхности запирающий слой, целесообразно снизить концентрацию ионов диффузанта. Однако подобная ситуация носит частный характер, поэтому примем в качестве критерия эффективности электрического разряда в газовой среде, применяемого для модификации поверхности металлических сплавов, концентрацию атомарных ионов диффузанта. Схема к анализу взаимосвязей в прослойке  $dx$  области катодного падения с координатой  $x$  показана на рис. 1.10.



*Рис. 1.9 Взаимосвязь процессов в ОКП*

Детально анализ параметров процессов в катодной области изложен в [2]. Структурная схема комплекса, в котором реализуется ТЭРГ, в наиболее широком рассмотрении включает катод, астоново темное пространство, астоново свечение (катодная пленка), катодное темное пространство, катодное (отрицательное, тлеющее) свечение, фарадеево темное пространство, положительное столб, анодную

область, анод. Кроме анода и катода перечисленные составляющие входят в газовый промежуток; зоны от астонового темного

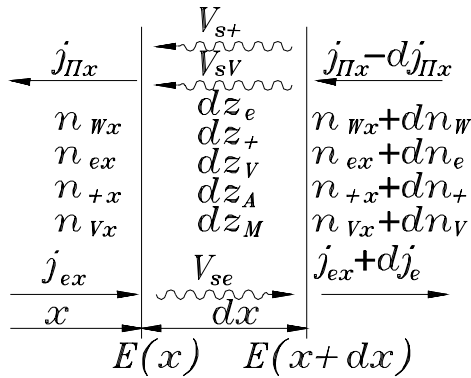
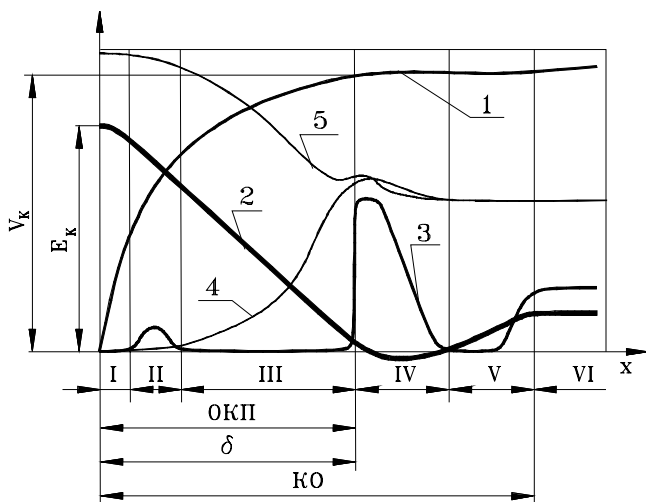


Рис. 1.10. Схема взаимосвязей в слое ОКП

просторную к фарадеевому темному пространству включительно составляют катодную область, в которой и проходят все основные процессы, связанные с реализацией ВДГРТ; а область катодного падения напряжения состоит из астонового темного просторную, астонового свечения, катодного темного пространства. Следует отметить, что в вопросе названий перечисленных составных катодной области существует некоторое расхождение, в этой работе используются термины, установленные энциклопедическими изданиями по физике.

Качественные соотношения параметров в катодной области отображенные на рис. 1.11. Современные представления относительно интерпретации оптической структуры зон катодной области сводятся к следующему. Электроны, как следствие вторичной ионно-электронной, а при нагретом катоде – и термоэлектронной эмиссий вылетают с поверхности и ускоренно под действием поля двигаются в направлении анода. Поскольку электроны вылетают с катода с энергией порядка 1 эВ [5], они не в состоянии при столкновениях с частицами газа не только их ионизировать, но даже возбуждать, поэтому в астоновом темном пространстве нет свечения. Тем не менее именно в этой части ЭРГ напряженность поля  $E$  наибольшая, электроны довольно быстро увеличивают свой энергетический уровень (по некоторым оценкам порядка 5-20 эВ [6]), который достаточен для возбуждения частиц газа в астоновом свечении. Зоны астоновых пространств

относительно узкие, поле еще достаточно сильное, энергия электронов достигает уровней, которые начинают превышать



*Рис. 1.11. Характер качественных соотношений в катодной области ЭРГ*

*1 – падение напряжения  $U(x)$ , 2 – напряженность поля  $E(x)$ , 3 – интенсивность свечения, 4 – концентрация электронов  $n_e$ , 5 – концентрация ионов  $n_+$ .*

*I – астово темное пространство, II – астово свечение, III – катодное темное пространство, IV – катодное свечение, V – фарадеево темное пространство, VI – положительный стол, КО – катодная область*

значение, соответствующие максимуму сечения возбуждения, сечение уменьшается, процесс возбуждения затухает, что отвечает катодному темному пространству. Зато именно здесь начинается фаза интенсивной лавинообразной ионизации, образуется наибольшее количество электронов и ионов. Последние двигаются к катоду со значительно меньшей скоростью в сравнении со скоростью электронов по направлению к аноду, поэтому концентрация ионов  $n_+$  превышает концентрацию электронов  $n_e$ , возникает положительный объемный заряд тем больший, чем ближе к катоду, который отвечает закону изменения напряженности поля. Лавинообразный характер ионизации предопределяет максимум рождения электронов в конце катодного темного пространства, где напряженность поля уже незначительна, энергия электронов

возвращается к значениям, характерным для возбуждения, следствием чего есть катодное (отрицательное, тлеющее) свечение. Части электронов удается пройти всю или значительную часть ОКП с небольшим количеством или вообще без столкновений, поэтому концентрация электронов за счет ионизации продолжает еще незначительно расти. По мере уменьшения энергии электронов спадает и свечение – это зона фарадеевого темного пространства. Рост поля в зоне фарадеевого темного пространства оказывает содействие увеличению и стабилизации средней энергии электронов вокруг значений 1-2 эВ, характерных для положительного столба, хотя в спектре есть и более энергичные частицы, предопределяющие возбуждение и свечение, однако они менее интенсивные, чем в катодном свечении. С ростом концентраций  $n_e$  и  $n_+$  увеличивается вероятность рекомбинационных явлений, поэтому уже в конце ОКП наблюдается уменьшение скорости прироста количества электронов. В каждой зоне катодной области параллельно с изменением количества электронов изменяется и количество ионов, а также их концентрация  $n_+$  (многозарядные ионы представляют такое незначительное количество, которым можно пренебречь [1]). Уже в конце ОКП наблюдается приблизительное равенство концентраций электронов и ионов (в части катодного свечения возможен даже незначительный отрицательный заряд), в положительном столбе выполняется условие квазинейтральности.

Для положительного столба вследствие постоянной и значительной концентрации электронов характерно малое падение потенциала  $\varphi$ , причем свечение в этой зоне вызвано возвращением возбужденных частиц на низшие энергетические уровни. Кроме того, анодное падение напряжения в ТЭРГ отрицательное (фактически потенциал увеличивается), одного порядка с падением напряжения в положительном столбе, поэтому для целиком допустимого упрощения можно считать, что катодное падение напряжения  $U_K$  приблизительно равно межэлектродному потенциалу  $\varphi$ . Плазма в положительном столбе поддерживается исключительно благодаря процессам, которые только и в нем проходят, приэлектродные процессы для него не имеют сколько-нибудь существенного значения, фактически он выполняет роль проводника между приэлектродными областями ЭРГ [7]. По этой причине процессы в положительном столбе относительно ВДГРТ могут учитываться только в аспекте баланса энергии (потери на излучение, хотя они в реальных параметрах режимов малозначашие), длина столба тоже мало влияет на падение напряжения в газовом промежутке в связи с большой электропроводностью. В совокупности это допускает рассмотрение ЭРГ относительно ВДГРТ на упрощенной модели в

составе только катодной области. Граница ОКП  $\delta$  отвечает границе катодного свечения со стороны катода.

Изменение количества электронов в объеме слоя с основанием в единичную площадь  $s$ , за единицу времени

$$dz_e = dz_{euy} + dz_{euc} - dz_{ep}, \quad (6)$$

где  $dz_{euy}$  –изменение количества электронов за счет ударной ионизации,

$dz_{euc}$  – то же, за счет ступенчатой ионизации,

$dz_{ep}$  –то же, за счет рекомбинации.

Каждый из компонентов уравнения (6) зависит от частоты процесса и числа частиц инициатора, поэтому

$$dz_e = n_{ex}(v_{uy} + v_{uc} - v_p) \cdot s \cdot dx. \quad (7)$$

Частота процесса определяется концентрацией контрагента  $n_W$ , скоростью относительного движения инициатора  $V_v$  и сечением процесса  $\sigma_W$

$$v = n_W \cdot V_v \cdot \sigma_W \quad (8)$$

Для многокомпонентных газовых сред частота является суммой парциальных частот, если положить, что в ней применяется в качестве контрагентов  $g$  диффузантов и  $r$  корректоров, то она определится

$$v = \sum_1^{i=g} n_{Di} \cdot V_v \cdot \sigma_{Di}(V_v) + \sum_1^{i=r} n_{Ki} \cdot V_v \cdot \sigma_{Ki}(V_v). \quad (9)$$

Суммируя парциальные частоты, фактически усредняем относительную скорость, а вместе с ней – и сечение процесса, зависящее от энергии (скорости) инициатора, введя обозначения

$$n_W = \frac{p_W}{kT} = C_p p_W, \quad p_W = K_{pW} \cdot p, \quad \text{где } k\text{-постоянная Больцмана, } T\text{-}$$

термодинамическая температура,  $p_W$  – парциальное давление компонента,  $K_{pW}$  – коэффициент объемной доли компонента в газовой среде,  $p$  – давление в разрядной камере,  $C_p$  – константа концентрации компонента, преобразуем формулу (9)

$$v = C_p \cdot p \cdot \overline{V_v} \left( \sum_1^{i=g} K_{pDi} \cdot \overline{\sigma_{Di}(V_v)} + \sum_1^{i=r} K_{pKi} \cdot \overline{\sigma_{Ki}(V_v)} \right). \quad (10)$$

Среднее сечение для каждого компонента

$$\overline{\sigma_W(V_v)} = \int_0^{\infty} \sigma(V) \cdot f(V) \cdot dv, \quad (11)$$

где  $\sigma(V)$  –зависимость сечения от скорости инициатора,  $f(V)$  – распределение скоростей инициатора.



Эквивалентное сечение газовой среды как характеристика влияния состава газа на частоту

$$\sigma_v = \sum_1^{i=g+r} K_{pi} \cdot \overline{\sigma_i(V_v)} \quad (12)$$

Скорости инициаторов значительно превосходят скорости контрагентов, поэтому последние можно считать неподвижными, скорость относительного движения заменим скоростью инициатора (электрона в событии, совместном с атомом, молекулой или ионом, иона – с нейтральной частицей и т. п.).

Тогда частоты ионизации

$$v_{iy} = C_p \cdot p \cdot \overline{V_e} \cdot \sigma_{v_{iy}}, \quad (13)$$

$$v_{uc} = C_p \cdot p \cdot \overline{V_e} \cdot \sigma_{v_{uc}}, \quad (14)$$

рекомбинации для любого компонента  $W$

$$v_p = \overline{V_e} \cdot \sum_1^{i=g+r} n_{(+Wi)} \overline{\sigma_{pe(+Wi)}(V_e)}. \quad (15)$$

Распределение скоростей, принятое априори, например, Максвелла, Драйвестайна [5,6], может быть впоследствии скорректировано по плотности тока. Средняя скорость электрона может определяться идентификацией базовой точки распределения, которая характеризуется координатами: скоростью электрона  $V$ , полученной им в результате бесстолкновительного движения от катода до слоя  $x$  (она определяется точно по изменению потенциала поля относительно катода), и вероятностью такого движения (отношение суммы сечений контрагентов в единичном объеме к единичной площади). Кроме того, учитывается наличие частиц, имеющих такую же скорость, но после столкновений. Для каждой координаты одномерного поля (а для условий используемого в модификации поверхности разряда поле можно считать одномерным: охватывающая схема анод-катод, реальное отсутствие амбиполярной диффузии - размеры нейтральных частей камеры незначительны- и поперечного дрейфа) распределение скоростей будет индивидуально.

Изменение концентрации электронов в слое

$$dn_e = dz_e / Q_{se} = dz_e / V_{se} s, \quad (16)$$

где  $Q_{se}$  – объем пространства дрейфа электронов в единицу времени,

$V_{se}$  – скорость их дрейфа, зависящая от напряженности поля в точке  $x$  и подвижности частицы  $\mu$ .

$$V_{se} = \mu_e \cdot E(x), \quad (17)$$

$$\mu_e = q_e / m_e \bar{V}_e C_p \cdot p \sigma_{vce}, \quad (18)$$

где  $q_e$ ,  $m_e$  – заряд и масса электрона,

$\sigma_{vce}$  – эквивалентное сечение столкновений электронов с компонентами газовой среды.

Изменение концентрации электронов в области катодного падения напряжения

$$n_e(x) = \frac{m_e \bar{V}_e C_p \cdot p \sigma_{vce}}{q_e s} \int \frac{dz(x)}{E(x)} + C_{ne}. \quad (19)$$

Постоянная  $C_{ne}$  определяется из начальных условий: при  $x=0$  начальная энергия электронов  $\varepsilon_{e0} \approx 1...2$  эВ [4,5], откуда при начальной скорости электронов  $V_{e0} = \sqrt{2\varepsilon_{e0}/m_e}$  их концентрация у катода  $n_{e0} = j_{eK}/V_{e0}$  ( $j_{eK}$  – плотность потока с катода); при  $x=\delta$  концентрация электронов стабилизируется  $dn_e(\delta)/dx \approx 0$ .

Плотность тока, который на аноде на 99,7% является электронным [6], связана с характеристиками разряда

$$j = q_e n_{e\delta} V_{se\delta} = q_e n_{e\delta} \mu E(\delta), \quad (20)$$

где  $n_{e\delta}$  – концентрация электронов на границе области катодного падения напряжения,

$V_{s\delta}$  – скорость дрейфа электронов в том же сечении,

$\mu$  – подвижность электронов в газовой среде,

$E(\delta)$  – напряженность поля в сечении  $\delta$  (граница ОКП, которая может быть определена экспериментально, исходя из условия, что при неизменной плотности тока  $p \delta = const.$ )

Традиционно [5], напряженность поля в ОКП с целью упрощения задачи принимается постоянной, что предусматривает линейный закон изменения потенциала поля. Более точно соответствует зондовым измерениям потенциала в катодной области линейный закон изменения напряженности

$$E(x) = \frac{2U_K}{\delta} \left(1 - \frac{x}{\delta}\right), \quad (21)$$

где  $U_K$  – катодное падение напряжения (учитывая, что анодное падение напряжения в тлеющем аномальном разряде отрицательное, одного порядка с падением напряжения в положительном столбе, которое в свою очередь незначительно – примерно 1В/см, можно считать равными катодное падение напряжения и межэлектродный потенциал).

В этом случае закон изменения потенциала

$$\varphi(x) = U_K \left(\frac{2x}{\delta} - \frac{x^2}{\delta^2}\right). \quad (22)$$

Если учесть, что изменение количества однозарядных ионов  $dz_+ = dz_e$ , то доля ионов произвольного сорта в общем количестве

$$dz_{(+W)} = dz_e \cdot \frac{K_{pW} \cdot \overline{\sigma_{ueW}}(V_e)}{\sum_1^{i=g+r} K_{pWi} \cdot \overline{\sigma_{ueWi}}(V_e)} \cdot \quad (23)$$

Изменение концентрации ионов данного сорта по аналогии с (16)

$$dn_{+W} = dz_{+W} / V_{s+W} \cdot s, \quad (24)$$

где  $V_{s+W}$  - скорость дрейфа ионов в поле, аналогично (17)

$$V_{s+W} = \mu_{+W} \cdot E(x). \quad (25)$$

Столкновения с электронами, масса которых существенно меньше масс атомов и молекул, практически не влияют на подвижность ионов, поэтому учитываются только столкновения с тяжелыми частицами, аналогично (18)

$$\mu_{+W} = q_e / m_{+W} \cdot \overline{V_{+W}} \cdot C_p \cdot p \sigma_{vc+W}, \quad (26)$$

где  $m_{+W}$  - масса иона произвольного компонента,

$\overline{V_{+W}}$  - его средняя скорость,

$\sigma_{vc+W}$  - эквивалентное сечение столкновений ионов в газе

$$\sigma_{vc+W} = \sum_1^{i=g+r} K_{pWi} \cdot \sigma_{c+Wi}, \quad (27)$$

( $\sigma_{c+Wi}$  - сечение столкновений ионов исследуемого сорта с тяжелыми частицами газовой смеси).

Изменение концентрации ионов определенного сорта

$$n_{+W}(x) = \frac{m_{+W} \overline{V_{+W}} C_p \cdot p \sigma_{vc+W}}{q_e s} \int \frac{dz_{+W}(x)}{E(x)} + C_{n+}. \quad (28)$$

Константа  $C_{n+}$  определяется с условия  $dn_{+W}(\delta)/dx \approx 0$ .

Общая концентрация ионов

$$n_+(x) = \sum_1^i n_{+Wi}(x). \quad (29)$$

Выше отмечалось, что эффективность процесса модификации во многом определяется концентрацией атомарных ионов основного диффузанта. Механизм их образования, если исходным для него есть молекулярное состояние, определяется диссоциацией электронным ударом по уравнению (4) и диссоциативной рекомбинацией

$e + M^+ = A + A$  с дальнейшей ступенчатой или ударной ионизацией.

Изменение числа молекул определенного сорта

$$dz_{MW} = dz_{MWy} + dz_{MWp}, \quad (30)$$

где  $dz_{MWy}$  - количество молекул, диссоциировавших от электронного удара,

$dz_{MWp}$  - то же, за счет диссоциативной рекомбинации.

$$dz_{MWy} = -n_{MW} \overline{V_e} \cdot \overline{\sigma_{dyMW}(V_e)} \cdot n_e s \cdot dx, \quad (31)$$

$$dz_{MWp} = -n_{+MW} \overline{V_e} \cdot \overline{\sigma_{dpMW}(V_e)} \cdot n_e s \cdot dx, \quad (32)$$

где  $n_{MW}$ ,  $n_{+MW}$  - концентрации молекул и молекулярных ионов исследуемого компонента, определяемые по (28),

$\overline{\sigma_{dyMW}(V_e)}$ ,  $\overline{\sigma_{dpMW}(V_e)}$  - средние значения сечений диссоциации электронным ударом и диссоциативной рекомбинации в зависимости от энергии электронов.

Изменение количества атомов произвольного компонента

$$dz_{AW} = -dz_{MW} \cdot z_{AM}, \quad (33)$$

где  $z_{AM}$  - количество атомов в молекуле.

Так как изменение концентрации атомов компонента  $dn_{AW} = dz_{AW} / s \cdot dx$ , то концентрация любого компонента в атомарном состоянии от координаты поля зависит только через закономерности изменения концентраций электронов и молекулярных ионов данной компоненты газа. Образовавшиеся атомы как нейтральные частицы остаются в том же объеме, поэтому изменение их концентрации численно равно изменению количества. Закономерности распределения атомарных компонентов рассчитывается по данным, полученным из (19), (23), (28). Аппроксимация результатов расчета дает зависимость  $dz_{AW}(x)$ , интегрированием которой получим функцию изменения числа атомов компонента по координате поля. Далее образование атомарных ионов аналогично изложенному выше процессу ионизации, но в эквивалентных сечениях следует учесть сечения атомарных частиц. В конечном счете, имеет значение доля атомарных ионов в падающем потоке, поэтому их концентрация может быть определена по (28).

Плотность падающего потока

$$j_{II} = j_+ + j_V, \quad (34)$$

где  $j_+$  - плотность потока ионов,

$j_V$  – то же, быстрых частиц.

Обе составляющие плотностей определяются как сумма произведений соответственных концентраций компонентов газа на скорость их дрейфа

$$j_+ = \sum_1^{i=g_M} n_{+Mi} \cdot V_{s+Mi} + \sum_1^{i=g_A} n_{+Ai} \cdot V_{s+Ai} + \sum_1^{i=r_M} n_{+Mi} \cdot V_{s+Mi} + \sum_1^{i=r_A} n_{+Ai} \cdot V_{s+Ai}, \quad (35)$$

где  $g_M$ ,  $g_A$ ,  $r_M$ ,  $r_A$  – соответственно количество видов диффузантов и корректоров в молекулярном и атомарном состояниях.

Быстрые частицы образуются вследствие резонансной перезарядки по (5), изменение их количества

$$dz_{VW} = v_{pn+W} \cdot n_{+W}, \quad (36)$$

где  $v_{pn+W}$  – частота процесса резонансной перезарядки между ионами и частицами соответствующей компоненты газа,

$n_{+W}$  – концентрация ионов исследуемой составляющей.

Изменение концентрации быстрых частиц

$$dn_{VW} = dz_{VW} / V_{s+W} \cdot s, \quad (37)$$

где  $V_{s+W}$  – скорость дрейфа иона данного сорта в момент резонансной перезарядки.

Интегрирование (37) дает закон изменения концентрации быстрых частиц вдоль поля, который используется для расчета плотности их потока по аналогии с (35)

$$j_V = \sum_1^{i=g_M} n_{VMi} \cdot V_{s+Mi} + \sum_1^{i=g_A} n_{VAi} \cdot V_{s+Ai} + \sum_1^{i=r_M} n_{VMi} \cdot V_{s+Mi} + \sum_1^{i=r_A} n_{VAi} \cdot V_{s+Ai} \quad (38)$$

Распределение частиц падающего потока по энергиям может быть установлено по методике, аналогичной расчету средней скорости электронов (концепция вероятности скорости, соответственно – энергии частиц, которые проходят определенную зону ОКП без столкновения с другими частицами) или по [4]. Зная энергетические характеристики падающего потока, можно рассчитать константы скорости процессов, проходящих в поверхностном слое металла, исходя при этом из предпосылки, что в первую очередь идут реакции, которые энергетически в данный момент наиболее выгодны.

Таким образом, принципиально возможно изменение не только количественных, но и качественных соотношений между плотностями потоков составляющих газовой среды. Основными факторами управляемости процесса ВДГРТ являются напряженность поля, зависящая от межэлектродного потенциала и давления газовой

среды в разрядной камере, а также свойства газовой среды, которыми является эквивалентное сечение конкретного процесса, поэтому, учитывая различный, в некоторых случаях – принципиально отличающийся, характер зависимости его составляющих от энергии частиц, возможно заранее аналитически обосновывать количественные соотношения между компонентами в зависимости от требуемых результатов модификации, включая фазовый состав поверхности. Варьируя составом газовой среды, в том числе – и непосредственно в ходе процесса, представляется возможным реализовывать различные по своим задачам технологические режимы, включая и формирование комбинированных слоев. Последнее открывает возможности для более тонкого учета условий эксплуатации объекта модификации.

Однако дальнейшее применение выше приведенных аналитических выкладок возможно только после решения задачи о распределении средней скорости электронов, поскольку этот параметр формирует сечения всех подпроцессов.

### ***1.2.2. Средняя скорость электронов***

Принято считать [5, 7], что вероятность скорости электронов  $V_{ex}$  в любой прослойке одномерной (одномерная модель допустима, если учесть особенности конструктивной схемы взаимно охватывающей системы катод-анод, характерной для процессов ВДГРТ) ОКП с координатой  $x$  подчиняется распределению Максвелла  $M(V)$ , которое в незначительной мере может искажаться эффектами второго порядка [6] (далее для упрощения выражений индексы причастности параметра к электронам и координате прослойки не указываются)

$$P(V, x) = M(V)dV = C_M \cdot \frac{V^2}{c^3} \cdot e^{-\frac{V^2}{c^2}} dV, \quad (3)$$

где  $P(V, x)$  – вероятность наличия в прослойке  $x$  электронов со скоростью в диапазоне  $V \dots V+dV$ ;

$c$  – наиболее вероятная скорость электронов в прослойке ОКП с координатой  $x$ ;

$C_M$  – константа нормирования распределения на единицу,  
 $C_M = 4/\sqrt{\pi}$ .

Известны также исследования, в которых есть ссылки на другие распределения, например - на распределение Драйвестайна [5, 6], которые отличаются в основном тем, что скорость в показателе

экспоненты входит в четвертой степени. Тем не менее для изложенной ниже методики решения задачи относительно средней скорости вид распределения вероятностей принципиальной роли не играет, поскольку не изменяет принятой в ней модели.

Известны методы решения задачи о скорости электронов, базирующиеся на кинетическом уравнении для электронов как частного случая общего кинетического уравнения Больцмана для функции распределения частиц в газовой среде [5]. Недостатком этого метода прежде всего является его сложность (возможно только приближенное решение, например - на основе системы полиномов Лежандра, так называемое приближение Лоренца, которое может применяться лишь для несильных полей, что исключает возможность его использования в ОКП).

Предлагаемая методика базируется на введении понятия базовой для каждой прослойки с координатой  $x$  скорости  $V_x$ . В качестве базовой примем скорость, которая гарантировано идентифицируется практически для всей ширины ОКП (ширина части ОКП с гарантированной идентификацией базовой скорости зависит от конкретных параметров процесса) - это скорость, которую имеет электрон, прошедший весь путь от катода до прослойки  $x$  без столкновений. За пределами ширины части ОКП с гарантированной идентификацией базовой скорости средняя скорость может определяться экстраполяцией закона изменения ее в этой части на диапазон, где такая идентификация по предложенной методике базовой скорости невозможна. Следует заметить, что некоторая погрешность в этом случае несравненно меньшая в сопоставлении с расчетами, в которых сечение столкновений с целью упрощения вообще предлагается считать независимым от скорости электронов.

При линейном законе изменения напряженности поля в ОКП [2] базовая скорость определяется

$$V_x = \sqrt{\frac{2\varepsilon_x}{m_e}} = \sqrt{\frac{2\varphi_x q_e}{m_e}} = \sqrt{\frac{4U_K(x - x^2/2\delta)q_e}{\delta m_e}}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_x$  – энергия электрона, который двигался без столкновений от катода до прослойки  $x$ ,

$m_e$  – масса электрона,

$\varphi_x$  – потенциал поля в прослойке  $x$ ,

$q_e$  – заряд электрона,

$U_K$  – катодное падение напряжения,

$\delta$  – ширина ОКП.

Вероятность столкновения электрона с произвольной

контрчастицей сорта  $W$  на пути от катода до координаты ОКП  $x$

$$P_C = Q_C / Q, \quad (5)$$

где  $Q_C$  – эффективный объем пространства возможного столкновения в объеме газа  $Q = Sx$  с основой размером в единичную площадь  $S$  и длиной  $x$ .

$$Q_C = s_c x = (s_{cn} + s_{cq}) x,$$

где  $s_c$ ,  $s_{cn}$ ,  $s_{cq}$  – сумма эффективных площадей мишеней стычек, в том числе – соответственно с нейтральными и заряженными частицами.

$$s_{cn} = \sum_{i=1}^W n_{wi} Q \sigma_{ci} = x s \sum_{i=1}^W C_p P_{wi} \sigma_{ci} = C_p x s p \sum_{i=1}^W K_{pwi} \sigma_{ci}, \quad (6)$$

где  $Z_{wi}$  – количество частиц любого сорта в объеме газа  $Q$ ,

$\sigma_{ci}$  – эффективное сечение столкновений, которое определяется через эффективный диаметр контрчастицы, при этом размерами самого электрона пренебрегаем,  $\sigma_{ci} = \pi d_{wi}^2 / 4$ ,

$n_{wi}$  – концентрация частиц произвольного сорта,

$P_{wi}$  – парциальное давление произвольного компонента.

$$s_{cq} = \int_0^x n_q(x) \sigma_{cq}(V) dx, \quad (7)$$

где  $n_q(x)$  – концентрация заряженных частиц в зависимости от координаты поля,

$\sigma_{cq}(V)$  – сечение стычек электрона с заряженной частицей.

Следует заметить, что закон распределения заряженных частиц  $n_q(x)$  может быть определен по методике, которая изложена в [2], но при этом нужно среднее значение скорости электронов, что и является решением данной задачи. С целью допустимого упрощения эта составляющая не учитывается, при этом примем во внимание, которое при сравнительно невысоких степени ионизации, частоте рекомбинационных явлений и электрон-электронных столкновений относительно небольшая. Кроме того потеря этой составляющей компенсируется тем, что при расчете суммы эффективных площадей мишеней столкновений с нейтральными частицами не учитывается частичное, или даже полное взаимное перекрытие части из них, т.е. сумма этих площадей в действительности несколько меньше. С этими допущениями вероятность столкновения электрона

$$P_C = x C_p p \sum_{i=1}^W K_{pwi} \sigma_{ci} = x C_p p \sigma_{vc}, \quad (8)$$



где  $\sigma_{vc} = \sum_{i=1}^w K_{pwi} \sigma_{ci}$  - эквивалентное сечение упругих столкновений электрона с компонентами газовой среды.

Вероятность бесстолкновительного пробега электрона от катода до прослойки с координатой  $x$

$$P_0 = 1 - P_C. \quad (9)$$

Для определения параметров распределения вероятностей скоростей электронов в прослойке предлагается модель опорной

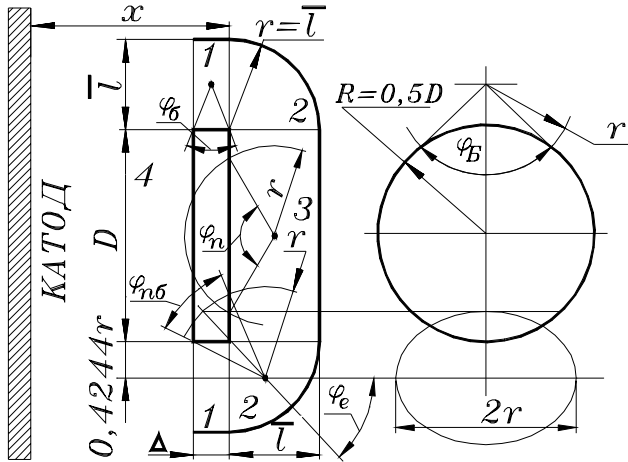


Рис. 1.12 Схема формирования контрольного объема:

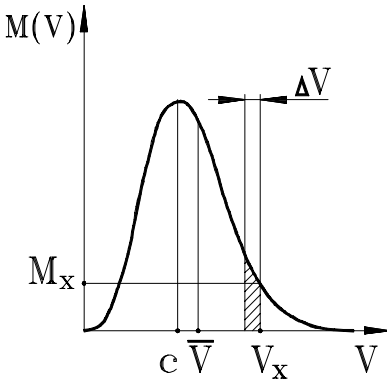
1 – зона бокового отражения; 2 – зона передне-бокового отражения; 3 – зона переднего отражения; 4 – зона вторичного отражения

точки. Суть этой модели иллюстрируется рис. 1.12 и 1.13. Базовую скорость  $V_x$  будут иметь не только электроны, которые без столкновений прошли путь от катода до прослойки с координатой  $x$ . Кроме этих электронов приблизительно такую же скорость, поскольку для использования распределения вероятностей нужно оперировать определенным (в идеале – бесконечно малым) интервалом скоростей, будут иметь и электроны, возвратившиеся в прослойку  $x$  после отражения их вследствие столкновения в некоторый элемент фазового пространства перемещений - контрольный объем (КО). Размеры этого объема устанавливаются, исходя из следующих соображений. Очевидно, что для удобства вычислений с использованием плотности тех или других потоков целесообразно основу КО выбрать в форме круга (минимальный

периметр) с единичной площадью  $s$ . Тогда диаметр круга определится как  $D = \sqrt{4s/\pi}$ . Толщина объема  $\Delta$  может быть принята, если одновременно с ней определится с диапазоном скоростей  $\Delta V$ . Возвращение электрона в ту же координату поля  $x$  после отражения обеспечило бы ему тот же базовый энергетический уровень  $\varepsilon_x$ , если бы не было потерь энергии. Итак, электрон, который сначала пролетел от катода через прослойку  $x$  без столкновений, возвратится в результате упругого столкновения (неупругие не рассматриваются, поскольку они существенно уменьшают энергию электрона и она становится несравненно меньшей по отношению к базовой) в эту же координату поля с энергией, которая уменьшится на величину [5]

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_x \frac{2m_e}{m_v} (1 - \cos\theta) = \frac{m_e^2 V_x^2}{m_v}, \quad (10)$$

где  $m_v$  – приведенная масса контрчастиц столкновения;



*Рис. 1.13. Схема для определения скорости электронов*

$$m_v = \sum_{i=1}^w K_{pWi} m_{Wi}, \quad m_{Wi} -$$

масса контрчастиц соответствующего сорта;

$\theta$  – угол изменения направления движения, поскольку считается, что схема столкновения сферически симметрична, можно для упрощения не учитывать составляющую  $(1 - \cos\theta)$ .

Через диапазон уменьшения энергии можно определить диапазон скоростей электрона, в пределах

которого отслеживается вероятность его кинетических параметров

$$\Delta V = V_x - \sqrt{V_x^2 - \frac{2\Delta\varepsilon}{m_e}} \quad (11)$$

Так как диапазону потерь энергии отвечает некоторый диапазон изменения потенциала поля, то из уравнения

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\varepsilon}{q_e} = \varphi(x) - \varphi(x - \Delta) = \frac{U_K}{\delta^2} [\Delta^2 + 2(\delta - x)\Delta] \quad (12)$$

можно определить размер толщины КО

$$\Delta = \sqrt{(\delta - x)^2 + \frac{\Delta\varphi \cdot \delta^2}{U_K}} - (\delta - x), \quad (13)$$

второй корень уравнения (со знаком минус перед всеми составляющими) не имеет смысла.

Замена бесконечно малой ширины диапазона скоростей  $dV$  конечным  $\Delta V$  заставляет в дальнейшем оперировать понятием не полной вероятности, а статистической вероятностью: эта замена вносит некоторую неточность, тем не менее величина ее не играет существенной роли. Например, для газовой среды N75Ar25 отношение диапазона скорости к скорости представляет  $K_V = \Delta V/V = 0,0000177$ , а вообще для газов, которые реально применяются во ВДГРТ  $K_V = 0,0000124 \dots 0,0000321$  (соответственно для углекислого газа и аммиака).

Отражение электронов бесстолкновительного движения в КО возможно как первичное, так и вторичное и все последующие, но поскольку вероятность последовательно идущих и зависимых процессов определяется как произведение составляющих вероятностей, то вторичные и последующие процессы учитываться не будут в связи с их исчезающе малой величиной. Действительно, для того, чтобы в КО попал электрон в результате вторичного отражения, необходимо учесть вероятность бесстолкновительного движения в одну из областей 1-3 (рис. 1.12), отражение в область 4 и следующего отражения в КО. При этом нужно было бы значительно расширить размер ширины диапазона скоростей  $\Delta V$ , поскольку потери энергии как результат двух столкновений удвоились бы, а это внесло бы заметную погрешность (форма заштрихованной зоны – трапецевидная). Первичное отражение возможно с передней 3, передне-боковой 2 и боковой 1 зон. Размеры этих зон регламентируются соответствующими размерами КО и средней длиной свободного пробега электронов в газовой смеси  $\bar{l}$ , методика определения которой изложена в [2]. Вероятность попадания электронов в КО в результате первичного отражения из любой зоны Z

$$P_B(Z) = P_0(Z) \cdot P_C(Z) \cdot P_{B\phi}(Z), \quad (14)$$

где  $P_0(Z)$  – вероятность бесстолкновительного пробега электрона к зоне Z,

$P_C(Z)$  – вероятность упругого столкновения в этой зоне,

$P_{B\varphi}(Z)$  – вероятность отражения электрона из зоны  $Z$  в контрольный объем.

Значение телесного угла  $\varphi$  зависит от положения точки столкновения в конкретной зоне. Очевидно, что среднее его значение, определенное путем интегрирования в пределах зоны, будет отвечать значению угла для положения точки столкновения в центре масс фигуры зоны. Поэтому все дальнейшие выкладки относительно показателей вероятности модели относятся именно к точкам, которые являются центрами масс соответствующих зон. По аналогии с формулой (8) вероятности бесстолкновительного пробега к соответствующим зонам определяются

$$\begin{aligned} P_0(1) &= 1 - (x - 0,5\Delta)C_p p\sigma_{vc}; \\ P_0(2) &= 1 - (x + 0,424\bar{l})C_p p\sigma_{vc}; \\ P_0(3) &= 1 - (x + 0,5\bar{l})C_p p\sigma_{vc} \end{aligned} \quad (15)$$

Вероятность упругих столкновений электронов с контрастицами в любой зоне:

$$P_C(Z) = s_{CZ} / s_Z, \quad (16)$$

где  $s_{CZ}$  - суммарная площадь мишеней стычек в зонах,

$s_Z$  - площадь зоны в сечении, перпендикулярном оси поля.

Для каждой зоны при многокомпонентном составе газовой смеси суммарная площадь мишеней определяется как произведение количества частиц соответствующего сорта  $z_{Wi}$  в объеме зоны  $Q_Z$ , концентрация которых  $n_{Wi}$ , на сечение упругих столкновений  $\sigma_{cWi}$

$$s_{CZ} = z_{Wi} \sigma_{cWi} = pC_p s_Z x_Z \sum_{i=1}^W K_{pWi} \sigma_{cWi} = pC_p s_Z x_Z \sigma_{vc}. \quad (17)$$

Тогда вероятность столкновений в любой зоне

$$P_C(Z) = pC_p \sigma_{vc} \cdot s_Z x_Z / s_Z, \quad (18)$$

где  $x$  – средние протяжности соответствующих зон, которые из рис. 1.12 определяются:  $x_1 = \Delta$ ,  $x_2 = \pi\bar{l}/4$ ,  $x_3 = \bar{l}$ .

Площади соответствующих зон из того же рисунка  $s_1 = s_2 = 4\pi(R\bar{l} + \bar{l}^2)$ ,  $s_3 = \pi R^2$ .

Вероятность отражения электрона из зоны  $Z$  в контрольный объем должна учитывать не только отношение объемов коноидов отражения в КО и полной сферы, но и то обстоятельство, что при равновероятности всех прицельных параметров  $\rho$  угол изменения

направления движения  $\theta$  неравновероятен, поскольку зависимость между прицельным параметром и углом отражения нелинейная  $\rho = 0,5d_{wi} \cos(\theta/2)$ . Таким образом, вероятность отражения в КО

$$P_{B\varphi}(Z) = \overline{K_\theta} \cdot P_B(\varphi), \quad (19)$$

где  $\overline{K_\theta}$  – среднее значение коэффициента коррекции вероятности в зависимости от угла  $\theta$  изменения направления движения электрона после отражения,

$P_B(\varphi)$  – вероятность отражения электрона с зоны  $Z$  в сектор  $\varphi$ .

Коэффициент коррекции вероятности выбирается, исходя из анализа интенсивности изменения угла  $\theta$  при равномерном изменении прицельного параметра  $\rho$ , которая характеризуется производной при единичном радиусе контрчастицы  $0,5d_{wi}$   $d\theta/d\rho = d(2 \arccos(\rho))/d\rho = 2/\sqrt{1-\rho^2}$ . Наименьшая интенсивность изменения угла будет иметь место при  $\theta=\pi$ , поэтому при этом значении угла коэффициент коррекции нормируется на единицу. Отношение производной при  $\theta=\pi$  к производной для произвольного угла дает коэффициент коррекции

$$K_\theta = \sqrt{1-\rho^2} = \sqrt{1-\cos^2(\theta/2)} = \sin(\theta/2). \quad (20)$$

Среднее значение коэффициента коррекции в диапазоне углов изменения направления движения электрона в результате столкновения от начального  $\theta_{II}$  к конечному  $\theta_K$  (с учетом того, что отсчет углов ведется при сферической симметрии модели отражения в направлении, противоположном оси поля, а  $\theta_K - \theta_{II} = \varphi$ )

$$\overline{K_\theta} = \frac{\int_{\theta_{II}}^{\theta_K} \sin \frac{\theta}{2} d\theta}{\theta_K - \theta_{II}} = \frac{2 \cdot \left( \cos \frac{\theta_{II}}{2} - \cos \frac{\theta_K}{2} \right)}{\varphi}. \quad (21)$$

Заметим, что формула (21) может использоваться только в диапазоне углов от нуля до  $\pi$ , т.е. для случая, когда коноид симметричен относительно оси поля, среднее значение коэффициента коррекции рассчитывается при  $\theta_{II} = \pi - 0,5 \cdot \varphi$  и  $\theta_K = \pi$ .

Специфика геометрии объемов, в которые попадут электроны после столкновения в зонах 1 и 2 заключается в том, что основу коноидов отражения из этих зон представляют не окружности, а сложные фигуры пересечения коноидов с КО. Приблизительно будем считать эти основы эллипсами с полуосями  $a$  и  $b$ , причем углы

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
образующих, соединяющих концы полуосей с вершиной коноидов обозначим  $\varphi_a$  и  $\varphi_b$ . Угол при вершине эквивалентного коноида определяется из условия одинаковых объемов реального и эквивалентного коноидов

$$\varphi_v = \arctg\left(\operatorname{tg}\varphi_b \cdot \sqrt{\operatorname{tg}\varphi_a / \operatorname{tg}\varphi_b}\right). \quad (22)$$

Значение углов для отдельных зон определяются:

$$\text{для зоны 1 } \varphi_{\delta} = 2\arctg(\Delta/\bar{l}), \quad \varphi_b = 2\arcsin(y/r), \quad (23)$$

$$\text{где } y = \sqrt{R^2 - \frac{(R^2 + (R + 0,5r)^2 - r^2)^2}{4(R + 0,5r)^2}}, \quad (24)$$

$$\varphi_{b\delta} = 0,5\varphi_{\delta}, \quad \varphi_{a\delta} = 0,5\varphi_{\delta}, \quad \theta_{II1} = 0,5(\pi - \varphi_{v1}),$$

$$\theta_{K1} = 0,5(\pi + \varphi_{v1}); \quad (25)$$

для зоны 2

$$\varphi_{n\delta} = \arccos(0,424) - \arctg(0,424r / (\Delta + 0,424r)), \quad (26)$$

$$\varphi_e = \arctg(0,424r / (\Delta + 0,424r)) + 0,5\varphi_{n\delta}, \quad (27)$$

$$\varphi_{II\delta} = 2\arcsin\left(\sqrt{R^2 - ((R^2 + (R + 0,424r)^2 - r^2 \sin^2 \varphi_e) / 2(R + 0,424r))^2} / r\right), \quad (28)$$

$$\varphi_{b,n\delta} = 0,5\varphi_{n\delta}, \quad \varphi_{a,n\delta} = 0,5\varphi_{II\delta}, \quad \theta_{II2} = \varphi_e - 0,5\varphi_{v2},$$

$$\theta_{K2} = \varphi_e + 0,5\varphi_{v2}; \quad (29)$$

$$\text{для зоны 3 } \varphi_n = 0,667\pi, \quad \varphi_{v3} = 0,333\pi \quad \theta_{II3} = \pi - \varphi_{v3},$$

$$\theta_{K3} = \pi, \quad (30)$$

где обозначение в формулах (25), (29)  $\varphi_{v(1-2)}$  - угол при вершине эквивалентного коноида, который определяется по формуле (22).

Поскольку схема столкновения сферически симметрична, то вероятность отражения в коноид с углом при вершине  $\varphi$  есть отношения телесного угла коноида  $\Theta$  к полному телесному углу сферы:

$$P_B(\varphi) = \Theta / 4\pi \quad (31)$$

Телесный угол определяется, если учесть, что один стерадиан вырезает на поверхности сферы площадь, размер которой  $r^2$  (рис. 1.12). Площадь поверхности сферического сегмента  $S_{\varphi} = 2\pi r^2(1 - \cos(\varphi/2))$ , поэтому телесный угол  $\Theta = 2\pi(1 - \cos(\varphi/2))$ , откуда вероятность отражения в этот телесный угол, принимая во внимание, что  $0,5 \cdot (1 - \cos(\varphi/2)) = \sin^2(\varphi/4)$ ,

$$P_B(\varphi) = \sin^2(\varphi/4), \quad (32)$$

при этом в качестве угла  $\varphi$  для каждой с трех зон принимается значение соответствующего угла при вершине эквивалентного коноида, определяемого по формуле (22)

Общая вероятность попадания электронов в КО в результате первичного отражения из всех зон

$$P_B = 1 - (1 - P_B(1)) \cdot (1 - P_B(2)) \cdot (1 - P_B(3)) \quad (33)$$

Окончательно, статистическая вероятность наличия в КО прослойки  $x$  электронов с базовой скоростью  $V_x$

$$P_{V_x} = 1 - (1 - P_0)(1 - P_B) \quad (34)$$

Из рис. 1.13 вытекает, что одному и тому же значению распределения  $M_x$  отвечают две скорости. Очевидно, нужно оперировать большим значением скорости (правая ветвь кривой), поскольку по определению базовая скорость должна находиться в области наибольших из возможных как скорость, которая сформирована бесстолкновительным движением. Тогда из формулы (3)

$$P_{V_x} = M_x \Delta V = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{V_x^2}{c^3} \cdot e^{-\frac{V_x^2}{c^2}} \Delta V \quad (35)$$

Наибольшая возможная скорость электронов в прослойке определится из выражения

$$c^3 e^{\frac{V_x^2}{c^2}} = \frac{4V_x^2 \cdot \Delta V}{P_{V_x} \sqrt{\pi}} = \frac{4K_V V_x^3}{P_{V_x} \sqrt{\pi}} = \frac{2,257 \cdot K_V V_x^3}{P_{V_x}} \quad (36)$$

После преобразования в вид, приемлемый для дальнейшего исследования

$$3 \ln(c) + \frac{V_x^2}{c^2} - \ln \frac{4 \cdot V_x^2}{M_x \sqrt{\pi}} = 0, \quad (37)$$

с помощью Mathcad 2000 Professional получим решение

$$c = \frac{1}{3} \cdot \left[ -6V_x^2 / W \left( \frac{-V_x^2}{24} \cdot \sqrt[3]{\frac{16^2 \cdot \pi}{V_x^4 / M_x^2}} \right) \right]^{0.5}, \quad (38)$$

которое после упрощения принимает окончательный вид

$$c = 0,816 \cdot \left[ -V_x^2 / W \left( -0,387 \cdot \sqrt[3]{M_x^2 / V_x^4} \right) \right]^{0.5}, \quad (39)$$

где  $W$  – специальная  $W$ -функция Ламберта, которая использует решение уравнения типа  $x = ye^y$  относительно  $y$ .

Среднее значение скорости электронов соответствует [6]

$$\bar{V} = 1,128 \cdot c \quad (40)$$

Анализ влияния погрешности в определении статистической

вероятности на значение средней скорости электронов проведем, исходя из того, что согласно рис. 1.13 погрешность значения распределения  $M(V)$

$$\Delta M(V) = 0,5 \cdot \Delta V \frac{dM(V)}{dV} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} K_V V_x^2 \frac{c^2 - V_x^2}{c^5} e^{-\frac{V_x^2}{c^2}}, \quad (41)$$

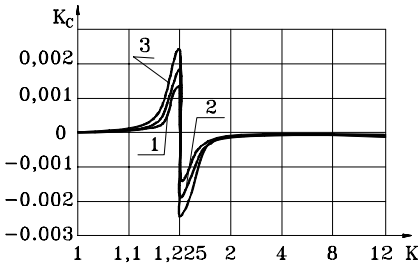
уточненное значение распределения

$$M(V) = M_x + \Delta M(V), \quad (42)$$

а уточненное значение наиболее вероятной скорости:

$$c_V = 0,816 \cdot \left[ -V_x^2/W \left( -0,387 \cdot \sqrt[3]{(M(V))^2/V_x^4} \right) \right]^{0,5}. \quad (43)$$

Тогда относительная погрешность определения средней скорости  $K_c = (c_V - c) / c$ . (44)



*Рис. 1.14. Зависимость относительной ошибки определения наиболее вероятной скорости от скорости электронов и вида газовой среды:*

1-  $K_V = 0,0000125$ ; 2-  $K_V = 0,0000225$ ; 3-  $K_V = 0,0000325$

Результаты расчетов абсолютных значений относительной ошибки определения наиболее вероятной скорости электронов, которая по (4) аналогична относительной погрешности определения средней скорости, в зависимости от безразмерного параметра  $K = V_x/c$  представлены на рис. 1.14. Поскольку на погрешность определения распределения по (41) влияет диапазон скорости  $\Delta V$ , линейно

возрастающий с увеличением скорости  $V_x$ , и производная распределения по скорости  $d(V)/d$ , являющейся нелинейной функцией, то изменение соотношений между этими факторами обуславливает изменение знака относительной погрешности. Первый экстремум соответствует для всех видов газовых сред значению  $K=1,2247$  и не превышает 0,233%. С увеличением отношения скорости электронов к наиболее вероятной скорости погрешность незначительно, практически линейно увеличивается в области отрицательных значений, тем не менее эти точки уже не имеют практического значения, поскольку вероятность наличия электронов со скоростями, превышающими наиболее вероятную в



пять раз, очень незначительна (значение распределения в этой точке  $M(V)=7,835 \times 10^{-11}$ ). Относительная погрешность независима от наиболее вероятной скорости, поэтому для газовой среды стабильного состава характеристики распределения (наиболее вероятная скорость, мода распределения) не влияют на точность определения средней скорости. Учитывая незначительную величину погрешности при определении средней скорости можно считать приемлемой модель идентификации скорости электронов, изложенную выше. В сравнении с методиками, где сечение процессов принимается независимым от скорости, приведенная методика разрешает со значительно более близкой к реальности точностью прогнозировать кинетические характеристики процессов электрического разряда в газе.

### 1.2.3. Связь скорости электронов с энергетикой разряда

Основные элементарные процессы в разрядном промежутке преимущественно зависят от кинетики главных участников столкновений, прежде всего – от скорости электронов. В самом деле, вероятность любого элементарного процесса, определяемая его сечением, как для ионизационных, так и для рекомбинационных явлений, зависит от скорости инициаторов этого процесса, которыми и есть электроны.

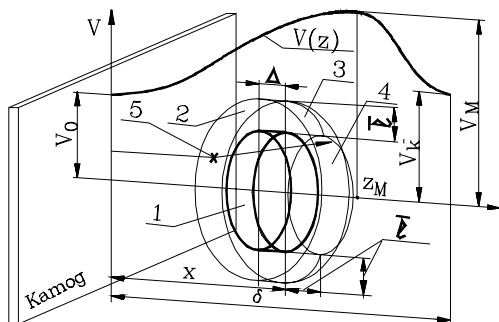


Рис. 1.15. Изменение средней скорости электронов в ОКП

Пространственная зависимость средней скорости электронов от координаты слоя и контрольным объемом (в дополнение к рис. 1.12) показана на рис. 1.15. Электроны на границе катод-газ имеют энергию порядка 1 эВ [7, с.

358], для которой начальная скорость  $V_0=0.5931 \cdot 10^6$  м/с. Для удобства расчета кинетики электронов будем разбивать область катодного падения по слоям (разделим его, например, на 50 зон, хотя

для точности и сложности расчетов количество слоев принципиальной роли не играет). Средняя скорость электронов после достижения определенного максимального значения  $V_M$  в некотором слое, который назовем слоем максимума с координатой поля  $x=z$ , плавно уменьшается и на внешней границе ОКП при энергии 2 эВ составляет приблизительно  $V_K=0.839 \cdot 10^6$  м/с (число электронов с энергией 3-4 эВ более чем на два порядка меньше [5, с. 359, 7, с. 324]). Обозначение зон вокруг контрольного объема соответствует рис. 1.12.

Некоторые из электронов могут пролетать контрольный объем после стычек (траектория 5), тем не менее их энергия (скорость) не отвечают исследуемому диапазону. Кроме того, часть электронов после столкновений под небольшим углом может вообще пролететь мимо контрольного объема, хотя их энергия в принципе могла бы уложиться в рамки диапазона. Тем не менее, учитывая равновероятность всех углов отражения (сферическая симметрия), такая же количество электронов на тех же условиях войдет в контрольный объем. Поэтому с целью упрощения аналитики, расчет ведется с учетом вероятности наличия в контрольном объеме электронов со скоростью в заданном диапазоне только исходя из объема, основу которого представляет единичная площадь.

Влияние параметров технологического режима, к которым относятся состав газа, его давление  $p$  и температура  $T$ , катодное падение напряжения  $U$ , плотность тока разряда  $j$ , на величину максимума скорости  $V_M$  и положение слоя максимума  $Z$  показано на рис. 1.16-1.18.

Установлено, что величина катодного падения напряжения  $U$ , изменяя только значение максимальной скорости электронов, не влияет на положение слоя максимума  $Z$ . Поэтому на рис. 1.16, 1.17. исследуется характер влияния параметров режима при катодном падении  $U=300$  В с тем, чтобы в дальнейшем откорректировать качественную картину влияния с учетом изменения состава газовой среды и катодного падения.

Из рис. 1.16 следует, что для всех параметров технологического режима наблюдается четкий минимум номера слоя с максимальным значением скорости при изменении давления. С увеличением плотности тока минимум номера слоя смещается в направлении от давления 0,85 тора до 1 тора. Абсолютное значение номера слоя максимальной скорости с увеличением и плотности тока, и давления увеличивается, тем не менее, при увеличении плотности тока после прохождения минимума рост номера слоя

максимальной скорости замедляется и при давлении 1,5 тора достигает меньших значений.

Аналогичное изменение максимального значения скорости электронов (рис. 1.17, скорость - в миллионах м/с). При всех параметрах режима наблюдается снижение максимального значения скорости в диапазоне давлений от 0,85 тора до 1 тора, причем при увеличении плотности тока минимум смещается в сторону большего давления.

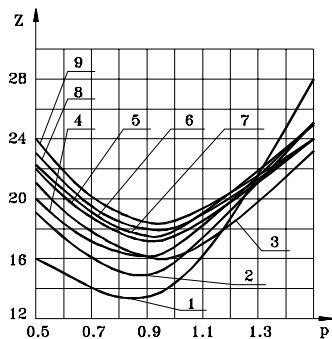


Рис. 1.16. Изменение номера слоя с максимумом скорости электронов (N75Ar25,  $U=300\text{ В}$ ) при параметрах режима: 1...3— $T=400^\circ\text{C}$ , 4...6— $T=500^\circ\text{C}$ , 7...9— $T=600^\circ\text{C}$ , 1- $j=5\text{ A/m}^2$ , 2- $j=10\text{ A/m}^2$ , 3- $j=20\text{ A/m}^2$ , 4- $j=12\text{ A/m}^2$ , 5- $j=20\text{ A/m}^2$ , 6- $j=30\text{ A/m}^2$ , 7- $j=20\text{ A/m}^2$ , 8- $j=30\text{ A/m}^2$ , 9- $j=50\text{ A/m}^2$

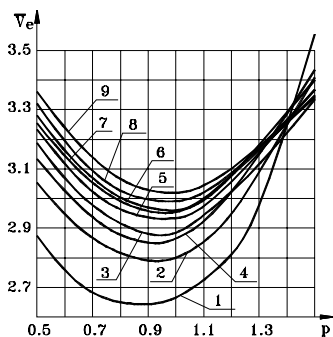
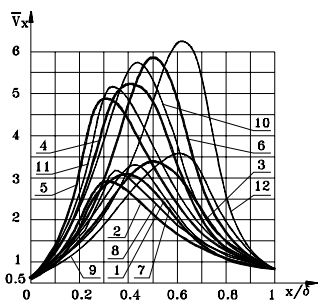


Рис. 1.17. Изменение максимума средней скорости электронов при параметрах режиму, аналогичных рис. 1.16.

Наличие двух характеристик - максимальной скорости и ее положение по ширине ОКП разрешает (при наличии начального и конечного значений, о чем отмечалось выше) построить графики изменения средней скорости электронов в зависимости от координаты поля. На рис. 1.18 дано сопоставления таких графиков для двух составов газовых сред: N75Ar25 - толстые кривые, N10Ar90 - тонкие кривые. Для упрощения графиков использованные данные только для температуры  $500^\circ\text{C}$ , скорость, как и на рис. 1.17 - в миллионах метров за секунду. Рис. 1.18 подтверждает, что напряжение катодного падения не изменяет положения максимального значения средней скорости электронов, тем не менее влияет на ее величину. Экстремумы на графиках для смеси, в которой преобладает аргон, сдвинуты дальше от катода и максимальная скорость для них больше, что может быть объяснено большей

большой

ионизационной активностью аргона, для которого большее значение приведенного интегрального сечения ионизации. Этим же и объясняется экспериментально установленный факт, что для сред с преобладающим содержанием аргона при одинаковых условиях одна и та же плотность тока достигается при меньших значениях напряжения [4]. Там же была выдвинута гипотеза, что наличие минимума проводимости газовой среды может объясняться взаимным перекрытием газокинетических сечений отдельных электронов с увеличением их количества при росте давления или снижении температуры. Сначала при увеличении давления проводимость газовой среды возрастает, потом нейтральные частицы все больше частично или полностью перекрывают друг друга и эффективность роста количества контрагентов снижается. Повышение энергетических свойств разряда достигается увеличением катодного падения напряжения, т.е. нагрев детали все в



*Рис.1.18. Изменение средней скорости электронов по ширине ОКП: 1,3,5,7,9,11 –  $U=300В$ , 2,4,6,8,10,12 –  $U=900В$ ; 1,4,7,10 –  $p=0,5$  тор, 2,5,8,11 –  $p=0,9$  тора; 3,6,9,12 –  $1,5$  тора*

большей мере ведется за счет повышения энергии падающего потока, а не за счет количества частиц потока. Для сравнения кинетики электронов и параметров разряда проведенная серия экспериментов на установке ПИА-1512 (диаметр камеры 500 мм, ее высота – 1200 мм). Образец детали изготовлен из стали 30, причем он не имеет концентраторов поля активная площадь вместе с подвеской составляет 0,1573 м<sup>2</sup>. Прежде всего, следует заметить, что представленные на рис. 1.19, графики, отображающие экспериментальные данные, могут быть в точности повторены только в аналогичных условиях,

поскольку все параметры фиксировались при стабильной температуре. Поддержка подобных условий возможна только по условию теплового баланса, а он, в свою очередь, зависит от многих факторов: площади и массы детали, расстояния от анода, наличия анодного экрана, характера и интенсивности охлаждения и т.п. Поэтому сейчас важны не столько количественные, сколько качественные соотношения. Тем не менее, на одно важное обстоятельство следует обратить внимание и в этих условиях. Этот

вопрос относительно измерения мощности разряда, а особенно - удельной мощности.

Прежде всего, этот показатель не может быть нормативным, поскольку зависит, как указано выше, от индивидуальных

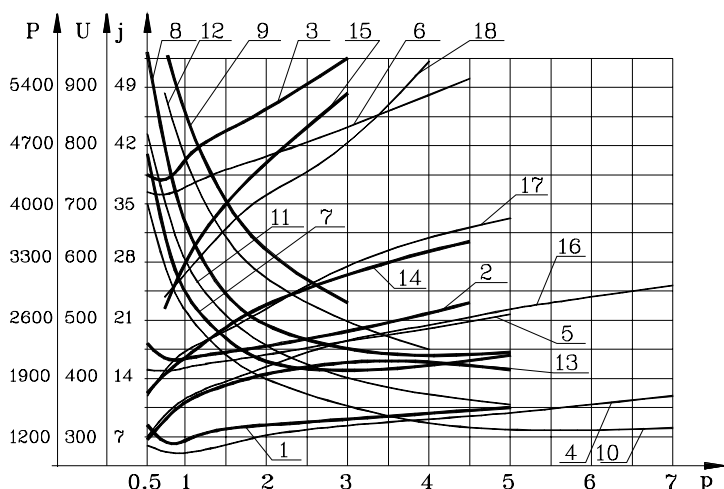
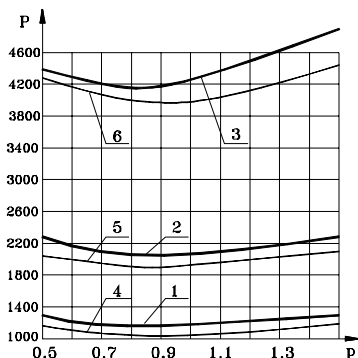


Рис. 1.19. Электрические параметры разряда в режиме термостабилизации (толстые линии -  $N75Ar25$ , тонкие -  $N10Ar90$ ): 1-6 – активная (потребляемая) мощность разряда  $P$ , Вт; 7-12 – постоянная составляющая напряжения  $U$ , В; 13-18 – постоянная составляющая плотности тока  $j$ ,  $A/m^2$ ; 1,4,7,10,13,16 – температура  $400^\circ C$ ; 2,5,8,11,14,17 -  $500^\circ C$ ; 3,6,9,12,15,18 -  $600^\circ C$

особенностей как детали, так и оборудование. Фиксация мощности как произведения напряжения и ток, путем измерения их приборами может дать погрешность порядка 300%. Даже в нашем случае, когда в блоке питания применялся мощный LC-фильтр мощность постоянной составляющей в некоторых случаях была на 35% меньше активной (потребляемой).

Практически во всех экспериментах четко зафиксирован минимум потребляемой (активной) мощности при давлении в пределах 0,8...0,9 тора (рис. 1.20). Сопоставление газовых сред, в которых преобладает азот, со смесями, в которых доминировал аргон, приводит к выводам, полностью совпадающим с прежними относительно графиков средних скоростей электронов: разряд в смесях, где преобладает аргон проходит при меньших напряжениях,

мощность в режиме стабилизации температуры- меньше.



*Рис.1.20. Зависимость активной (потребляемой) мощности от давления в режиме стабилизации температуры (толстые линии – N75Ar25, тонкие – N10Ar90): 1,4 – температура 400 °С; 2,5 - 500 °С; 3,6 - 600 °С*

Последнее обстоятельство, кроме того, обосновывается большей массой частиц, которые бомбардируют поверхность катода, за счет чего поверхность более интенсивно нагревается при сравнительно меньшей плотности падающего потока и его энергии. Тем не менее плотность тока в аргоновых средах преимущественно больше, что объясняется повышенной ионизационной активностью аргона (исключение - при температуре 600°C, когда более существенными и весомыми становятся явления, связанные с термоэлектронной эмиссией).

Таким образом, сопоставление данных по средней скорости электронов и активной мощности разряда подтверждает наличие минимума в области давлений 0,8...1 тор. Учитывая, что экстремумы этих двух величин полностью совпадают, можно сделать вывод, что средняя скорость электронов является именно той характеристикой, которая формирует электрические параметры разряда в газовой среде, поскольку она определяет интенсивность ионизационных процессов.

### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Ионная химико-термическая обработка сплавов/Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти.- М.: Изд-во МГТУ им Баумана, 1999.- 400 с.
2. Пастух И. М. Процеси вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій модифікації поверхні металевих сплавів // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2000. - №6, ч.3.- С. 126-135.
3. Пастух И. М. Алгоритми та компоненти моделювання газорозрядних процесів вакуумно-дифузійних технологій. – Хмельницький: Вісник технологічного університету Поділля; - 2001; - №5, С. 99-107.
4. Жиглинский А.Г., Кучинский В.В.. Массоперенос при взаимодействии плазмы с поверхностью. – М.: Энергоатомиздат,

1991. –206 с.

5. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. -М.: Наука, 1992.- 535 с.

6. Мирдель Г. Электрофизика./Пер. с нем. – М.: Мир, 1972, - 608 с.

7. Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов. – М.: Наука, 1980. –416 с.

8. Пастух І. М., Давидов А. М., Здібель О. С. Електричні параметри вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій модифікації поверхні металів. Вісник ТУП, Хмельницький. 2002, №5, с. 170-175.

## **1.3 Реальные газоразрядные процессы**

### ***1.3.1. Параметры реальных газоразрядных процессов***

Модификация поверхности металлических сплавов с помощью технологий, которые используют в качестве главного средства интенсификации электрический разряд в газовой среде низкого давления, позволяет реализовать концепцию управляемости результатами обработки в зависимости от требований эксплуатации. Тем не менее, на практике эти результаты прогнозируются в основном, руководствуясь экспериментально-технологической моделью, которая фактически является базой данных, полученных путем технологических проб, возможно даже оптимизированных по тем или другим критериям, тем не менее, мало приспособленной к автоматизированному проектированию процессов, которые обеспечивали бы заданные конечные показатели модификации и экономические характеристики процессов. Кроме того, метод технологических проб - дорогой, особенно в случаях, когда нужно спроектировать оптимальный вариант технологического режима для обработки деталей, имеющих сложную форму, локальные исключения и т.п. или для уникальных единичных изделий. Учитывая указанные недостатки традиционных методов, перспективной следует считать модель, в которой главными факторами формирования падающего на деталь (катод) потока есть элементарные подпроцессы в ОКП ЭРГ. Модель квалифицируется как мультипроцесна, поскольку в ней учитываются наиболее влиятельные среди элементарных явлений в ОКП. Основные принципы предложенной модели изложены в [1].

Мультипроцесна модель может быть представлена в виде аналитических зависимостей, которые характеризуют подпроцессы в ОКП. Несмотря на то, что экспериментальных данных по этим вопросам в литературе значительное количество [2-5], тем не менее, они не обработаны за некоторым исключением с целью обеспечения возможности их использования в аналитических методиках. В некоторых случаях имеющиеся зависимости весьма сложны по методологии расчета или не всегда адекватно отображают экспериментальный материал, упрощенные уравнения неточно учитывают индивидуальные особенности поведения отдельных компонентов газовой среды, например, потенциал ионизации аргона больший, чем в азоте, но сечение растет более стремительно и достигает больших значений в максимуме, а в универсальных зависимостях эти подпроцессы шли бы параллельно.



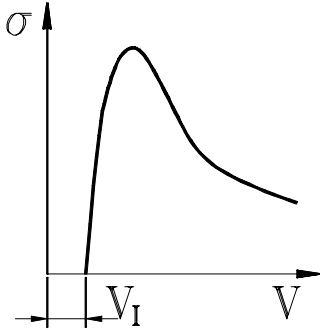


Рис. 1.21. Типовая зависимость сечения ударной ионизации от скорости электрона

**1.3.1.1. Ударная ионизация.** Типичный вид зависимости сечения ударной ионизации от энергетических характеристик активных частиц (в области характерных для технологий значений) показан на рис. 1.21. Наиболее приемлемо экспериментальные данные сечения ударной ионизации  $\sigma_{uy}$  ( $\text{м}^2$ ) [2, с. 201, 3, с. 60] отображаются зависимостью вида

$$\sigma_{uy} = a \cdot 10^{-26} (V - V_I) \cdot e^{-b \left( \frac{V - V_I}{10^6} \right)^c}, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость электрона, м/с,

$V_I$  – скорость электрона, которая соответствует потенциалу ионизации, для молекулярного азота  $V_I = 2,343 \cdot 10^6$  м/с, для аргона  $V_I = 2,358 \cdot 10^6$  м/с, для молекулярного водорода  $V_I = 2,327 \cdot 10^6$  м/с, для атомарного азота  $V_I = 2,259 \cdot 10^6$  м/с, для атомарного водорода  $V_I = 2,187 \cdot 10^6$  м/с;

$a$ ,  $b$ ,  $c$  – числовые коэффициенты, значения которых приведены в табл. 1.4.

Сечение ударной ионизации атомарных компонентов рассчитывается по методологии, изложенной в [5], по формуле

$$\sigma_{uy} = a \cdot 10^{-20} \left( \frac{V^2 - V_I^2}{V^2} \right)^{1.5} \cdot \frac{b}{(V^2 - V_I^2)/V_I^2 + c} \quad (2)$$

**1.3.1.2. Ступенчатая ионизация.** Сечение ступенчатой ионизации ( $\text{м}^2$ ) [3, с. 67] в общем виде описывается уравнением

$$\sigma_{uc} = a_c \cdot 10^{-20} (2,843 \cdot 10^{-12} \cdot V^2 - b_c), \quad (3)$$

где  $a_c$ ,  $b_c$  – числовые коэффициенты, значения которых приведены в табл. 1.5.

**1.3.1.3. Рекомбинация.** Известно [2,3,4,8], что при концентрации частиц в газовой среде  $n < 10^{13} \text{ см}^{-3}$  преобладают процессы радиационной рекомбинации, при больших концентрациях порядка  $n > 10^{17} \text{ см}^{-3}$  основными становятся явления ударной

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
рекомбинации. Диссоциативная рекомбинация играет существенную роль в низкотемпературной молекулярной плазме.

Таблица 1.4.

**Числовые коэффициента для определения сечения ударной ионизации**

Компонент	Источник и границы применения	Уравнение	a	b	c
Азот молекулярный N <sub>2</sub>	[2, с.201], $\epsilon \leq 1150$ эВ	Точное	1,692	0,185	1,082
		Упрощенное	1,95	0,2	1,1
Аргон атомарный Ar	[2, с.201], $\epsilon \leq 1200$ эВ	Точное	7,999	1,164	0,519
		Упрощенное	6,6	1	0,555
Азот молекулярный N <sub>2</sub>	[3, с.60], $\epsilon \leq 200$ эВ	Точное	1,471	0,085	1,498
		Упрощенное	1,5	0,085	1,5
Аргон атомарный Ar	[3, с.60], $\epsilon \leq 200$ эВ	Точное	4,065	0,477	0,83
		Упрощенное	4	0,5	0,8
Водород молекулярн. H <sub>2</sub>	[3, с.60], $\epsilon \leq 200$ эВ	Точное	1,142	0,409	0,972
		Упрощенное	1,2	0,4	1
Водород молекулярн. H <sub>2</sub>	[3, с.60], $\epsilon \leq 750$ эВ	Точное	1,988	0,877	0,644
		Упрощенное	2	0,85	0,667
Азот молекулярный N <sub>2</sub>	[3, с.60], $\epsilon \leq 750$ эВ	Точное	1,799	0,245	0,976
		Упрощенное	2	0,25	1
Азот атомарный N	[5, с.181], $\epsilon \leq 270$ эВ	Точное	0,77301	34	10
Водород атомарн. H	[5, с.181], $\epsilon \leq 270$ эВ	Точное	0,8787	9,3	2,5

Фоторекомбинация имеет значение, если нет других процессов, в которых принимают участие две частицы, при малой концентрации электронов, которая не способствует более или менее заметной трехчастичной рекомбинации. Для определения типа рекомбинационных явлений рассмотрим состояние ионизированной газовой среды с параметрами, характерными для ВДГРТ модификации поверхности металлов. При давлении  $p=1$  тор и температуре  $T=500^\circ\text{C}=773^\circ\text{K}$  концентрация частиц в газе определится

$$n = 9,658 \cdot 10^{18} \text{ p/T} = 1,25 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3} \quad (4)$$

Плотность электронного тока на границе ОКП

$$j_{ec} = q_e n_{e\delta} V_{se\delta}, \quad (5)$$

где  $q_e$  - заряд электрона,  $q_e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ А} \cdot \text{с}$ ,

$n_{e\delta}$  - концентрация электронов на границе ОКП,

$V_{se\delta}$  - скорость дрейфа электронов под влиянием поля на границе ОКП.

Максимальная плотность тока в экспериментах с реальными ЭРГ составляла  $j_{ec} = 140 \text{ А/м}^2$ , номинальные же значения плотности тока в типичных процессах модификации представляют  $j_{ec} = 5 \dots 20 \text{ А/м}^2$ .

Таблица 1.5.

**Числовые коэффициенты для определения сечения ступенчатой ионизации**

Компонент	a <sub>c</sub>	b <sub>c</sub>
Аргон Ar	0,2	11,5
Водень H <sub>2</sub>	0,076	8,7
Азот N <sub>2</sub>	0,085	6,2

Подвижность электронов на границе ОКП

$$\mu_{e\delta} = q_e / m_e \overline{V}_e C_p p \sigma_{vse}, \quad (6)$$

где  $m_e$  – масса электрона,  $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ ,

$\overline{V}_e$  - средняя скорость электрона на границе ОКП, где энергия электронов стабилизируется и соответствует их энергии в положительном столбе  $\varepsilon_{ПС} = 1 \dots 2 \text{ эВ}$  [3, с.359], тогда средняя скорость имеет значение порядка  $\overline{V}_e = 0,5931 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ ;

$C_p$  – константа концентрации компонента,  $C_p = 1/kT$ , при константе Больцмана  $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  и типичной температуре газовой среды  $T = 773 \text{ К}$  константа концентрации компонента  $C_p = 9,368 \cdot 10^{19} \text{ с}^2/\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ,

$\sigma_{vse}$  – сечение столкновений электронов с частицами газа, в газовой среде, где преобладает молекулярный азот,  $\sigma_{vse} = 11,32 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ .

Таким образом подвижность электронов при выбранных условиях  $\mu_{e\delta} = 209,8 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Известно, что напряженность поля в положительном столбе  $E_{ПС} \approx 1 \dots 1,5 \text{ В/см} = 100 \dots 150 \text{ В/м}$  [9], и, приняв

напряженность поля на границе ОКП равной  $E(\delta)=100$  В/м, определим скорость дрейфа электронов в поле  $V_{se\delta} = \mu_{e\delta} E(\delta) = 2,098 \cdot 10^4$  м/с. Тогда концентрация электронов на

$$n_e = j_{ec} / q_e V_{se\delta} = (0,0297 \dots 0,0595) \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}, \quad (7)$$

$$\alpha = (2,38 \dots 4,76) \cdot 10^{-7}.$$

Неравновесной газоразрядной плазмой считается слабоионизированный газ при степени ионизации  $\alpha = 10^{-8} \dots 10^{-6}$  [6, с. 72]. Обычная температура электронов при этом порядка 1 эВ, что соответствует принятым выше условиям, со значительным отрывом температуры электронов от температуры газа. При подобной низкой степени ионизации основным видом рекомбинации является ударная, так как для фоторекомбинации, когда столкновения должны происходить с периодом не меньше времени гашения возбуждения, а тем более для тройной рекомбинации нет условий.

**1.3.1.4. Ударная рекомбинация.** Справочные материалы, касающиеся ударной рекомбинации, используют в качестве главного показателя коэффициент ударной рекомбинации  $\beta$ . Применяемая в этой работе методика базируется на одностипном показателе, характеризующим вероятность тех или других подпроцессов, а именно – их сечения. Для перехода от коэффициента ударной рекомбинации к сечению учтем, что изменение количества электронов в прослойке вследствие ударной рекомбинации  $dz_{ep}$  может определяться как через сечение, так и через коэффициент рекомбинации, исходя из того, что скорость изменения количества электронов вследствие рекомбинации

$$\frac{dn_{ep}}{dt} = -\beta n_e n_+, \quad (8)$$

где  $n_e$ ,  $n_+$  - соответственно концентрации электронов и положительных ионов.

$$dz_{ep} = -n_+ n_e (\overline{V_e})^2 \sigma_{yp} s \cdot dt = -\beta n_+ n_e V_{se} s \cdot dt, \quad (9)$$

где  $\sigma_{yp}$  – сечение ударной рекомбинации ( $\text{м}^2$ ),

$s$ - единичная площадь основы объема, в котором проходит рекомбинация.

Таким образом, сечение ударной рекомбинации может определяться через ее коэффициент

$$\sigma_{yp} = \beta / \overline{V_e} \quad (10)$$

Известные справочные материалы, в которых оперируют не коэффициентом ударной рекомбинации, а его отношением к концентрации электронов как функции энергии

электронов  $K_{\beta ne} = \beta/n_e$  [7, с.270], ( $\text{м}^6/\text{с}$ ).

Обработка упомянутых материалов дает следующие уравнения для определения отношения коэффициента ударной рекомбинации к концентрации электронов:

для азота

$$K_{\beta ne} = 10^{-33} (0,5 - 0,49442973(V \cdot 10^{-6} - 0,174))^{0,01528712}, \quad (11)$$

для аргона

$$K_{\beta ne} = 10^{-33} (0,5 - 0,494152632(V \cdot 10^{-6} - 0,174))^{0,01502406} \quad (12)$$

**1.3.1.5. Рекомбинация атомарных ионов.** В плазме умеренной и низкой плотности превалирует двухчастичная рекомбинация [5, с. 123], для которой за приведенной в том же источнике методикой рассчитывается скорость диэлектронной рекомбинации ( $\text{м}^3/\text{с}$ )

$$x_d = 10^{-19} \cdot A_d \cdot e^{-\frac{124,454}{T} b_d} \left( \frac{124,454}{T_e} \right)^{1,5} = \bar{V}_e \sigma_{op}, \quad (13)$$

где  $A_d$ ,  $b_d$  – коэффициенты, равные для атомарного азота соответственно 20 и 0,19, для атомарного водорода – 36,7 и 0,72 [5, с. 238-239];

$T_e$  – температура электронов в энергетических единицах измерения (эВ)

$$T_e = 2,8428 \cdot 10^{-12} (\bar{V}_e)^2, \quad (14)$$

$\sigma_{op}$  – сечение диэлектронной рекомбинации,  $\text{м}^2$ .

Расчеты показывают, что в диапазоне реально возможных скоростей электронов ( $2 \dots 6 \cdot 10^6$  м/с) сечение диэлектронной рекомбинации атомарных ионов на 6-12 порядков меньше сечений ионизации этих же компонентов, поэтому для упрощения этими элементарными процессами допустимо пренебречь.

**1.3.1.6. Диссоциативная рекомбинация.** Диссоциативная рекомбинация характерна прежде всего для молекулярного азота и проходит по схеме  $e + M^+ = A + A$  ( $M^+$  – положительный молекулярный ион,  $A$  – компонент в атомарном состоянии). Коэффициент диссоциативной рекомбинации слабо уменьшается с ростом энергии электронов, поэтому можно принять его при энергии электронов  $\varepsilon = 1$  эВ равным  $\beta_{dp} = 1,6 \cdot 10^{-19}$   $\text{м}^3/\text{с}$  [6, с. 152]. Тогда при скорости электронов в диапазоне  $0,5931 \cdot 10^6 \dots 5 \cdot 10^6$  м/с, что отвечает их энергии  $1 \dots 70$  эВ, сечение диссоциативной рекомбинации  $\beta_{dp} = (2,7 \dots 0,32) \cdot 10^{-25}$   $\text{м}^2$ , которое, таким образом, на 5 порядков меньше сечения ударной ионизации. Это дополнение допускает не учитывать в первом приближении диссоциативную рекомбинацию как составляющую баланса заряженных частиц.

**1.3.1.7. Диссоциация молекул электронным ударом.** Сечение диссоциации электронным ударом в зависимости от скорости электрона на основе экспериментальных данных [3, с. 76] моделируется уравнениями:

для молекулярного азота  $N_2$ , точная формула

$$\sigma_{деу} = 1,8325 \cdot 10^{-20} (V \cdot 10^{-6} - 1,7574)^3 \cdot e^{-1,1068(V \cdot 10^{-6} - 1,7574)}; \quad (15)$$

упрощенная формула

$$\sigma_{деу} = 1,85 \cdot 10^{-20} (V \cdot 10^{-6} - 1,7574)^3 \cdot e^{-1,1(V \cdot 10^{-6} - 1,7574)}; \quad (16)$$

для молекулярного водорода, точная зависимость

$$\sigma_{деу} = 2,0436 \cdot 10^{-20} (V \cdot 10^{-6} - 1,6776) \cdot e^{-0,9272(V \cdot 10^{-6} - 1,6776)^{1,32998}}; \quad (17)$$

упрощенная формула

$$\sigma_{деу} = 2,15 \cdot 10^{-20} (V \cdot 10^{-6} - 1,6776) \cdot e^{-0,9(V \cdot 10^{-6} - 1,6776)^{1,35}} \quad (18)$$

**1.3.1.8. Резонансная перезарядка.** Сечение резонансной перезарядки может определяться по формуле [3, с. 49]

$$\sigma_{рн} = \pi a^2 \frac{I_H}{I} \ln^2 \left( \frac{100V_0}{V_+} \sqrt{\frac{I_H}{I}} \right), \quad (19)$$

где  $V_0$  – скорость электрона на первой боровской орбите,  $V_0 = 2,19 \cdot 10^6$  м/с,

$\pi a^2$  – площадь первой боровской орбиты,  $\pi a^2 = 0,88 \cdot 10^{-20}$  м<sup>2</sup>,

$I_H$  – потенциал ионизации атомарного водорода,  $I_H = 13,6$  эВ,

$I$  – потенциал ионизации компонента, для атомарного аргона – 15,8 эВ, для атомарного азота – 14,5 эВ, для молекулярного азота – 15,6 эВ, для молекулярного водорода – 15,4 эВ,

$V_+$  – скорость иона, которая определяется через его энергию  $V_+ = K_{VE}(\epsilon)^{0,5}$  при числовом коэффициенте  $K_{VE}$  в м/с для аргона –  $2,195 \cdot 10^3$ , для молекулярного азота –  $2,622 \cdot 10^3$ , для атомарного азота –  $3,708 \cdot 10^3$ , для молекулярного водорода –  $9,78 \cdot 10^3$  и для атомарного водорода –  $13,83 \cdot 10^3$ .

Там же ([3, с. 49]) отмечается, что расчет по формуле (16) может давать относительно большое отклонение от действительных значений сечения (порядка 50%). В самом деле, в [8, с. 219] приводятся несколько другие значения, которые при больших энергиях порядка до 10 эВ отличаются от рассчитанных по формуле (16) приблизительно в таком же соотношении. Сведение данных из разных источников, в том числе – использование значений асимптот [3, с. 47] в качестве базовых точек привязки зависимостей, приводит к формуле общего вида, по которой с учетом коэффициентов,

приведенных в табл. 1.7, определяется сечение резонансной перезарядки ионов на собственных атомах или молекулах соответственно в м<sup>2</sup>

$$\sigma_{pn} = a_{pn} V_+^{-b_{pn}} \cdot 10^{-20} \quad (20)$$

### 1.3.1.9. Упругие столкновения электронов с частицами.

Сечение упругих столкновений (рассеяние электронов нейтральными атомами) на основе материалов, которые приведены в [2,3], зависит от сорта газа и скорости электронов. Характер зависимостей почти для всех газов имеет вид функции с относительно узким, но отвесным экстремумом, который в дальнейшем переходит вплоть до потенциала ионизации на участок относительно малого влияния энергии электрона. Аналитически эти зависимости имеют вид (сечение определяется в м<sup>2</sup>): для молекулярного азота

$$\sigma_{ceN_2} = (6 + 38 \cdot (\bar{V}_e \cdot 10^{-6} - 0,08) \cdot e^{-0,95\bar{V}_e \cdot 10^{-6}}) \cdot 10^{-20}, \quad (21)$$

для аргона

$$\sigma_{ceAr} = (4 + 11,845 \cdot \bar{V}_e \cdot 10^{-6} \cdot e^{-0,093(\bar{V}_e \cdot 10^{-6})^{2,293}}) \cdot 10^{-20}, \quad (22)$$

для молекулярного водорода

$$\sigma_{ceH_2} = (4,528 + 11,056 \cdot (\bar{V}_e \cdot 10^{-6} + 0,6) \cdot e^{-0,105(\bar{V}_e \cdot 10^{-6} + 0,6)^{3,621}}) \cdot 10^{-20}. \quad (23)$$

Для сложных газовых сред оперируют приведенным сечением упругих столкновений

$$\sigma_{vce} = \sum_1^i K_{pWi} \cdot \sigma_{ceWi}, \quad (24)$$

где  $\sigma_{ceWi}$  - сечение упругих столкновений электрона с частицами произвольного компонента,

$K_{pWi}$  - коэффициент объемной доли компонента в газовой среде,

$i$  - количество компонентов газовой смеси.

Таблица 1.7

### Числовые коэффициента для определения сечения резонансной перезарядки

Компонент газовой среды	Точное уравнение		Упрощенная зависимость	
	$a_{pn}$	$b_{pn}$	$a_{pn}$	$b_{pn}$
Аргон атомарный Ar	190,3891	0,1769	190	0,18
Водород атомарный H	384,5755	0,2314	395	0,24
Азот атомарный N	210,1672	0,1827	200	0,18
Азот молекулярный N <sub>2</sub>	213,9094	0,1868	215	0,19
Водород молекулярный H <sub>2</sub>	272,5858	0,2124	255	0,21

**1.3.1.10. Ступенчатая ионизация атомарных частиц С**

целью получения аналитических зависимостей для сечений ступенчатой ионизации атомарных компонентов выполнен анализ данных, приведенных в [3, 9]. В результате стало возможным аппроксимировать сечение в диапазоне от энергии возбуждения верхних уровней до энергии ионизации линейной зависимостью

$$\sigma_{uc} = K_{\sigma V}(V_i - V_g), \quad V_i \geq V_g, \quad (25)$$

где  $K_{\sigma V}$  – коэффициент крутизны зависимости, для атомарного азота  $K_{\sigma V} = 0,948 \cdot 10^{-26}$  м·с, для атомарного водорода  $K_{\sigma V} = 1,065 \cdot 10^{-26}$  м·с,

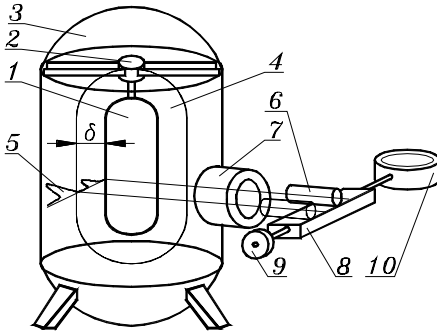
$V_i$  - скорость электронов в  $i$ - слое,

$V_g$  - скорость электронов, которая соответствует энергии возбуждения верхних уровней, для атомарного азота

$V_g = 1,906 \cdot 10^6$  м/с, для

атомарного водорода

$V_g = 1,894 \cdot 10^6$  м/с.



*Рис. 1.22. Схема для измерения ширины ОКП*

Относительно других видов подпроцессов отметим следующее. Неупругие столкновения ионов с атомами и молекулами, которые приводили бы к их возбуждению и ионизации сколь угодно существенной роли не играют, поскольку для этого ион

должен иметь скорость порядка скорости электрона на первой орбите ( $\sim 10^6$  м/с), а такие значения скорости соответствуют энергии в несколько десятков – сотен килоэлектронвольт, что в исследуемых технологиях невозможно. Кроме того известно, что электрону пройти область неупругих потерь значительно проще, поскольку сечение возбуждения по порядку величин  $\sim 10^{-21}$  м<sup>2</sup> значительно меньше сечения упругих столкновений ( $\sim 10^{-19}$  м<sup>2</sup>). Столкновения типа электрон-электрон, электрон-ион в зависимости от температуры и других условий менее заметны при степени ионизации порядка  $10^{-4} \dots 10^{-2}$ . При реальной степени ионизации, определенной выше, столкновения заряженных частиц существенной роли также не играют. Для образования отрицательных ионов необходимо иметь в газовой среде кислород, что уже по самому принципу



технологического процесса недопустимо, чем и объясняется обязательное наличие в системе подготовки газовой смеси устройств для очистки от кислорода и влаги.

**1.3.1.11. Ширина ОКП.** Наиболее определяющие для модификации поверхности металлов процессы проходят в ОКП. Для формирования геометрической модели ОКП прежде всего необходимая методика или данные для определения ее ширины  $\delta$ . Этот параметр экспериментально устанавливался для реальных режимов технологий путем фиксации границы катодного свечения со стороны катода, которая четко отличается от предыдущего катодного темного пространства и именно является концом ОКП. Схема системы для измерения ширины ОКП показана на рис. 1.22. Деталь-эталон 1, на которой отсутствуют концентраторы поля, с точно известной активной площадью поверхности с помощью подвески 2 установлена в разрядной камере 3. При возникновении разряда вокруг детали образуется ОКП 4, яркость свечения которой вдоль координаты поля неравномерна и качественно соответствует графику 5. Начало катодного свечения со стороны катода – наиболее яркий, резко отделенный от предыдущей зоны, поэтому четко отслеживается через иллюминатор 7 оптической системой 6. Так же четко визир оптической системы можно вести на край детали. Перемещения прицела выполняются поперечным суппортом 8 с помощью винтового устройства 9 и фиксируются с точностью 0,001 мм индикатором 10.

Последовательность обработки данных экспериментов заключалась в следующем. Для каждого из экспериментов в разных условиях (состав среды, температура, давление) устанавливалась зависимость от плотности тока вида

$$\Delta_j(j) = a_j + b_j j^{-C_j}, \quad (26)$$

при этом коэффициент корреляции колебался в пределах 0,82...0,912. Далее для каждого состава газовой среды зависимости (26) группировались с целью получения формул влияния давления  $p$  на ширину ОКП, которые имели общий вид

$$\Delta_{jp}(j, p) = (a_{jp} + b_{jp} j^{-C_{jp}}) - (d_{jp} + f_{jp} j^{-k_{jp}}) \cdot p. \quad (27)$$

Влияние абсолютной температуры по шкале Кельвина  $T$  устанавливалось двумя вариантами методик. В первом устанавливались зависимости ширины ОКП от температуры при постоянном давлении, потом вводилась поправка на смену давления. Полный температурный коэффициент определялся как произведение температурного коэффициента и поправки на давление, которые в общей форме имели вид

$$K_T(j, T) = (a_{KT} + b_{KT} j^{-C_{KT}}) + (d_{KT} + f_{KT} j^{-k_{KT}}) \cdot T, \quad (28)$$

$$K_{TP}(j, p) = (a_{TP} + b_{TP} j^{-C_{TP}}) - (d_{TP} + f_{TP} j^{-k_{TP}}) \cdot p + (m_{TP} + n_{TP} j^{-r_{TP}}) \cdot p^2 \quad (29)$$

По второму варианту в связи с незначительной разностью в крутизне линейных зависимостей температурных коэффициентов при изменении давления обработка велась по значениям, усредненным из массива данных при разных давлениях, поэтому температурный коэффициент определяется сразу и имеет вид

$$K_T(j, T) = (a_{KTP} + b_{KTP} j^{-C_{KTP}}) + (d_{KTP} + f_{KTP} j^{-k_{KTP}}) \cdot T \quad (30)$$

Вид зависимости выбирался таким, чтобы константы  $a, b, c, d, f, k, m, n, r$  со всеми индексами определялись при коэффициентах корреляции не ниже 0,911. Конечные результаты по обеим методикам учета температуры отличались незначительно, тем не менее второй вариант был существенно проще, поэтому он и принят в окончательной редакции методики определения ширины ОКП. Дальше полученные результаты сопоставлялись между собой с целью нахождения параметра, который разрешал бы вывести универсальные для всех видов газовых сред зависимости. В значительной мере все процессы в ОКП формируются прежде всего благодаря ионизационным явлениям, поэтому логически было бы применить как универсальный аргумент функций параметр, который и определяет интенсивность этих процессов. Попытки использовать в этом качестве газокинетические сечения компонентов не дали более или менее надежных корреляционных показателей. Была установлена возможность введения параметра  $\sigma_\Sigma$ , который обозначен термином приведенного интегрального сечения ионизации, и определяется

$$\sigma_\Sigma = \sum_1^i K_{pWi} \cdot \sigma_{\Sigma Wi}, \quad (31)$$

где  $\sigma_{\Sigma W}$  – интегральное сечение ионизации для любого компонента  $W$  газовой среды,

$$\sigma_{\Sigma W} = \int_0^\infty \sigma_{иyeW}(\bar{V}_e) \cdot 10^{26} \cdot dV, \quad (32)$$

$\sigma_{иye}(V_e)$  -зависимость сечения ударной ионизации электроном любого компонента газовой смеси от средней скорости (соответственно – энергии) электрона (коэффициент  $10^{26}$  введен для того, чтобы данные были удобными в дальнейшей обработке, и предусматривает, что сечение ударной ионизации определялось в  $m^2$ ).

Обработка известных данных по сечениям ионизации [2-7] дает значение интегральных или приведенных интегральных сечений

ударной ионизации для отдельных компонентов и типичных газовых сред: N100 – 30,81; Ar100 – 41,97; N25Ar75-39,18; N50Ar50-36,39; N75Ar25-33,6; N90N10-29,62. Тем не менее, удобнее в дальнейшем оперировать отношением приведенных интегральных сечений к любому базовому значению, в качестве которого выбрано приведенное интегральное сечение для среды N100. Тогда отношение приведенных интегральных сечений  $k_\sigma$  для других сред составляет: N25Ar75-1,272; N50Ar50-1,181; N75Ar25-1,091; Ar100 – 1,362; N90N10-0,961, N10Ar90-1.326.

В окончательном варианте при температуре поверхности детали  $T=300...900^\circ\text{K}$ , давлению в разрядной камере  $p=0,4...1,2$  тора, плотности тока  $j=4...32$  А/м<sup>2</sup> ширина ОКП (мм) может определяться для произвольной среды

$$\delta_w(j, p, T) = \delta_N(j, p) \cdot K_{TN}(j, T) \cdot K_\sigma(k_\sigma) \cdot K_{T\sigma}(k_\sigma), \quad (33)$$

где  $\delta_N(j, p)$  – зависимость между шириной ОКП, плотностью тока и давлением для среды N100 (коэффициенты корреляции в обозначенном диапазоне применения методики не ниже 0,89, для отдельных констант – 0,97...0,99),

$$\delta_N(j, p) = (2,275 + 7,586j^{-0,867}) - (1,075 + 5,355j^{-0,863}) \cdot p, \quad (34)$$

$K_{TN}(j, T)$  – температурный коэффициент для среды N100 (коэффициент корреляции не ниже 0,98),

$$K_{TN}(j, T) = (0,302 + 0,514j^{-0,419}) + (0,002013 - 0,001663j^{-0,749}) \cdot T, \quad (35)$$

$K_\sigma(k_\sigma)$  – коэффициент влияния отношения приведенных интегральных сечений (константа  $a_\sigma=0,38$ , определена с погрешностью не больше 3,495%),

$$K_\sigma(k_\sigma) = (1 + a_\sigma) - a_\sigma k_\sigma, \quad (35)$$

$K_{T\sigma}(k_\sigma)$  – поправка к температурному коэффициенту, учитывающая состав газовой среды,

$$K_{T\sigma}(k_\sigma) = 0,285 + 0,715k_\sigma. \quad (36)$$

**1.3.1.12. Средняя скорость электронов.** Методика определения средней скорости электронов в каждом отдельном слое ОКП разработана на основе концепции использования в качестве опорной точки так называемой базовой скорости – скорости электрона под действием электрического поля, которой он достигает при условии бесстолкновительного движения от катода к этому слою. Главные положения этой методики изложены в [10]. Форма зависимости изменения средней скорости электронов  $V_e$  отвечает рис. 1.23 [3, с. 375]. Электрон вылетает с катода, имея энергию порядка 1eV [3, с. 358], которая обеспечивает ему скорость

$V_{e0}=0.5931 \cdot 10^6$  м/с. После достижения максимального значения  $V_e$  скорость плавно уменьшается до величины  $V_{e\delta}$ , соответствующей установившейся энергии электрона на границе входа в положительный столб. Поскольку эта энергия равняется 2 эВ (количество электронов с энергией 3-4 эВ более чем на два порядка меньше [3, с. 359, 9, с. 324]), то ей соответствует скорость электрона

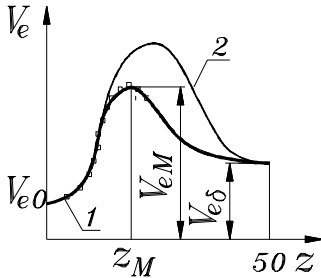
$V_{e\delta}=0.839 \cdot 10^6$  м/с. Лучшее всего кривая вида 1 на рис. 1.23 отображается формулой

$$\bar{V}_e(z) = V_{e0} + a_v z \cdot e^{-b_v z^{c_v}} \cdot 10^6, \quad (37)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты, зависящие от условий ЭРГ (состав смеси, давление газовой среды, температура газовой компоненты, плотность тока),

$z$  – номер слоя ОКП при их общем количестве -50, который связан с координатой поля  $x$  в направлении от катода формулой

$$x = 0,02 \cdot \delta \cdot z \quad (38)$$



*Рис. 1.23. Изменение средней скорости электронов по ширине ОКП*

Наиболее простым было бы установить зависимость коэффициентов от всех факторов влияния, тем не менее, учитывая, что модель зависит от четырех факторов, даже при чрезвычайно высокой точности подбора вида зависимостей и их параметров проблематично получить формулы, адекватно отображавшие весь массив расчетных данных средней скорости. Кроме того, на отрицательный результат попытки повлиял недостаток процедуры вычислительной системы MathCAD, в результате чего программа руководствуется принципом подгонки к большинству точек расчетных значений (обозначены квадратиками), поэтому часто она игнорировала точки на вершине кривой (а это собственно зона максимальных значений, наиболее существенно влияющих на ионизационные процессы), в результате чего кривая принимала вид 2 вместо реальной 1 со значительно большим значением максимума и существенным смещением положения экстремума. По этим причинам было разработана специальная методика обработки многофакторных моделей данных (более детально она изложена в [11]), причем для идентификации кривой использовались только опорные точки: начальная, конечная, максимума и соседняя к ней, однозначно отображавшие все другие данные. Главным преимуществом при этом было точное отображение зоны

максимальных значений. Разработанная методика определяет коэффициенты уравнения (38) в два этапа: сначала в зависимости от условий, в которых существует ЭРГ, рассчитываются максимальные значения скорости  $V_e$  и номер слоя, в котором расположенный этот максимум, а потом эти два значения переводятся в значение коэффициентов для уравнения (38). Для смеси, полностью состоящей из азота, максимальное значение средней скорости электронов в м/с как функции давления  $p$  (в пределах 0,4...1,2 тора), плотности тока  $j$  (4...120 А/м<sup>2</sup>), температуры газовой компоненты  $T$  (300...873°К), межэлектродного потенциала  $U$  (250...550 В) рассчитывается системой уравнений в последовательности исключения факторов влияния: давления

$$\begin{cases} K_{p_1}(p) = 1,565 - 1,415p + 0,85p^2 \\ K_{p_2}(p) = 0,075 + 0,064p - 0,066p^2 \\ K_{p_3}(p) = 0,0008601 - 0,0006156p + 0,0003584p^2 \\ K_{p_4}(p) = -0,245 + 0,284p - 0,166p^2 \\ K_{p_5}(p) = 0,004206 - 0,003856p + 0,002291p^2 \\ K_{p_6}(p) = 0,063 + 0,089p - 0,078p^2 \\ K_{p_7}(p) = 0,000002069 - 0,000001228p + 0,00000075p^2 \\ K_{p_8}(p) = -0,178 + 0,134p - 0,084p^2 \end{cases} \quad (39)$$

плотности тока

$$\begin{cases} K_{PJ1}(p, j) = K_{p_1}(p) \cdot j^{K_{p_2}(p)} \\ K_{PJ2}(p, j) = K_{p_3}(p) \cdot j^{K_{p_4}(p)} \\ K_{PJ3}(p, j) = K_{p_5}(p) \cdot j^{K_{p_6}(p)} \\ K_{PJ4}(p, j) = K_{p_7}(p) \cdot j^{K_{p_8}(p)} \end{cases} \quad (40)$$

температуры

$$\begin{cases} K_{TPJ1}(T, p, j) = K_{PJ1}(p, j) + K_{PJ2}(p, j) \cdot T \\ K_{TPJ2}(T, p, j) = K_{PJ3}(p, j) + K_{PJ4}(p, j) \cdot T \end{cases} \quad (41)$$

межэлектродного потенциала

$$\bar{V}_{eM}(U, T, p, j) = (K_{TPJ1}(T, p, j) + K_{TPJ2}(T, p, j) \cdot U) \cdot 10^6 \quad (42)$$

Аналогичным порядком определяется номер слоя, в котором средняя скорость электронов будет максимальной, но, как это установлено, поскольку положение максимума не зависит от межэлектродного потенциала  $U$ , то количество факторов исключения будет меньшей, а именно: давление

$$\begin{cases} K_{ZP1}(p) = 13,648 - 19,871p + 11,766p^2 \\ K_{ZP2}(p) = 0,167 + 0,144p - 0,153p^2 \\ K_{ZP3}(p) = 0,021 - 0,026p + 0,014p^2 \\ K_{ZP4}(p) = -0,079 + 0,193p - 0,131p^2 \end{cases} \quad (43)$$

плотность тока

$$\begin{cases} K_{ZPJ1}(p, j) = K_{ZP1}(p) \cdot j^{K_{ZP2}} \\ K_{ZPJ2}(p, j) = K_{ZP3}(p) \cdot j^{K_{ZP4}} \end{cases} \quad (44)$$

температура

$$z_M(T, p, j) = K_{ZPJ1}(p, j) + K_{ZPJ2}(p, j) \cdot T \quad (45)$$

со последующим округлением к ближайшему большему целому значению.

Сопоставление результатов определения по приведенной выше аналитической методике максимальной средней скорости электронов и положения максимального значения в ОКП с расчетными значениями дает отклонение по скорости в пределах 2%, по положению максимума - не больше одного слоя (согласно формуле (38) ОКП разбивалась на 50 слоев, хотя абсолютное значение количества слоев не имеет принципиального значения), что свидетельствует о ее приемлемости.

Дальнейший переход от значений скорости и номера слоя с максимумом ее к коэффициентам  $a$ ,  $b$ ,  $c$  уравнения (37) возможен в принципе при множестве комбинаций этих коэффициентов. Тем не менее, произвольный выбор хотя бы одного из них может привести к таким значениям других, которые будут чрезвычайно большими, или наоборот – очень малыми. В обоих этих случаях использование коэффициентов проблематично в связи с существенным влиянием на результат точности их выбора. Например, большие значения коэффициента  $c$  будут требовать очень точного представления коэффициента  $b$  и т.п. Поскольку коэффициент  $a$  влияет только на величину максимального значения средней скорости, но совсем не изменяет положения максимума, то уместно выбор начинать именно с этого параметра по системе уравнений

$$\begin{cases} K_{a1}(z_M) = 1900 \cdot z_M^{-4,5} - 0,002241 \\ K_{a2}(z_M) = 9,581 \cdot z_M^{-1,652} \\ a_V(z_M, \bar{V}_{eM}) = K_{a1}(z_M) + K_{a2}(z_M) \bar{V}_{eM} \cdot 10^{-6} \end{cases} \quad (46)$$

Тогда, учитывая значение средней скорости электронов в начальной, конечной точках и в точке максимума, вводя обозначение

$$w = \ln \left( \frac{\bar{V}_{eM} - V_{e0}}{a_v z_M \cdot 10^6} \right), \quad (47)$$

$$v = \ln \left( \frac{0,004918}{a_v} \right), \quad (48)$$

получим выражения для определения других двух коэффициентов

$$c_v = \frac{\ln w - \ln v}{\ln z_M - 3,912}, \quad (49)$$

$$b_v = -\frac{v}{50^{c_v}} = -\frac{w}{z_M^{c_v}} \quad (50)$$

В конечном результате сопоставление кривых средней скорости с коэффициентами, которые определены за формулами (44...50), с табличными расчетными кривыми указывает на точность результата не хуже 2% (отклонение в основном - по положению максимума скорости, которое вытекает из факта закругления расчетных значений номера слоя к более близкому целому, эту точность можно было бы улучшить, если бы количество слоев принять больше пятидесяти).

Результатом значительного объема расчетов для других газовых сред было

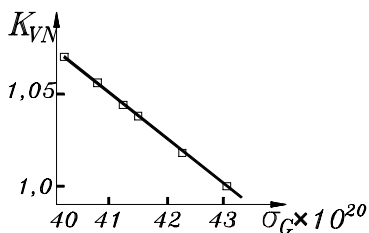


Рис. 1.24. Связь между отношением средних скоростей в азотной среде и приведенным газокинетическим сечением

установление обобщенной методики определения аналитического представления средней скорости электронов в ОКП для любого их состава. Поскольку само понятие базовой скорости электронов как скорости, которую имеет электрон под действием поля в случае, если ему удастся пролететь от катода до конкретного слоя без

столкновения, предусматривает в качестве главного фактора вероятности такого движения газокинетическое сечение частиц газа, то логически было бы ввести термин приведенного газокинетического сечения для произвольной газовой среды

$$\sigma_G = \sum_1^i K_{pwi} \cdot \sigma_{Gwi}, \quad (51)$$

где  $\sigma_{Gwi}$  – газокинетическое сечение компонента газовой

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
 среды, для Ar –  $40,2 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ , для N<sub>2</sub> –  $43,1 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ , для H<sub>2</sub> –  $22,9 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$  [3, с. 24], соответственно для газовых сред N25Ar75- $40,92 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ ; N50Ar50- $41,65 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ ; N75Ar25- $42,37 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ ; N90H10- $41,08 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ , N10Ar90- $40,49 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ . Установлена линейная связь между отношениями максимальных средних скоростей электронов для произвольной среды и азота (коэффициент корреляции - единица, рис. 1.24), аналогичным отношением положений максимума средней скорости электронов (коэффициент корреляции - 0,925, рис. 1.25) и приведенным газокинетическим сечением среды.

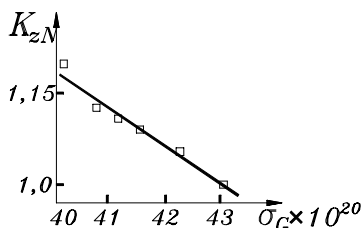


Рис. 1.25. Связь между отношением положений максимумов средних скоростей в азотной среде и приведенным газокинетическим сечением

Таким образом, для произвольной газовой среды максимальное значение средней скорости электронов определяется как произведение максимального значения средней скорости электронов в газе чистого азота на коэффициент отношения средней скорости относительно азота

$$\bar{V}_{eMW} = \bar{V}_{eM} \cdot K_{zN}, \quad (52)$$

аналогично

положение максимума средней скорости

$$z_{MW} = z_M \cdot K_{zN}, \quad (53)$$

где

$$K_{zN} = 2,06751 - 0,024784 \cdot \sigma_G \cdot 10^{20} \quad (54)$$

$$K_{zN} = 2,92137 - 0,044783 \cdot \sigma_G \cdot 10^{20} \quad (55)$$

### 1.3.1.13. Модель формирования электронного тока.

Опираясь на приведенные выше аналитические зависимости сформирована модель и разработана программа для расчета основных характеристик газоразрядных процессов в ОКП. Проблема разработки теоретических положений ВДГРТ модификации поверхности металлов состоит из двух главных подзадач - процессы в газовом промежутке и взаимодействие газовой среды с металлической поверхностью. Сопоставление расчетных данных основных параметров разряда с экспериментальными позволит сделать вывод о приемлемости аналитического представления соотношения компонентов его формирования.

Основа аналитического обеспечения программы сводится к определению перечисленных ниже параметров со ссылкой на



соответствующие формулы этой работы.

Приведенные интегральные сечения ионизации определяются по (30), (31); приведенный газокинетический сечение упругих столкновений - (21)-(24); концентрация компонентов газовой среды - (4); ширина ОКП - (25)-(36); параметры и средняя скорость электронов в ОКП - (37)-(50). Методика определения потока электронов из катода изложена в [12] - (1)-(10). Плотность токов, потоков и концентрация электронов - по аналогии с (5)-(7). Все частоты подпроцессов определены по однотипной формуле

$$v_w = \bar{V}_e \cdot n_w \cdot \sigma_w(V_e), \quad (56)$$

где  $n$  – концентрация контрастиц, принимающих участие вместе с электронами в подпроцессе,

$\sigma_w(V_e)$  – сечение подпроцесса взаимодействия электронов с контрастицами в зависимости от скорости электронов.

Для расчета сечений подпроцессов использовались зависимости (1)-(3), (10), (15)-(23). Учитывались частоты элементарных процессов, которые влияют на ионизацию газа

$$v_u = v_{uy} + v_{uc} - v_{yp} - v_{dey}, \quad (57)$$

где  $v_{uy}, v_{uc}, v_{yp}, v_{dey}$  – соответственно частоты ударной и ступенчатой ионизации, ударной рекомбинации и диссоциации молекул электронным ударом, которые определялись отдельно для молекулярных и атомарных составляющих газовой среды.

Скорость изменения количества электронов в каждом из слоев (при количестве слоев - 50)

$$dz/d\tau = v_u \cdot n_e \cdot 0,02 \cdot \delta \cdot s, \quad (58)$$

где  $n_e$  – концентрация электронов в текущем слое,  
 $s$  - единичная площадь катода.

Тогда изменение концентрации электронов при переходе от одного слоя к следующему

$$n_{i+1} = n_i \cdot \left( 1 + \frac{0,02\delta \cdot v_u}{V_{si}} \right), \quad (59)$$

где  $V_{si}$  – скорость дрейфа электронов в данном слое.

Экспериментальные данные плотности электронного тока полученные на промышленной установке с параметрами разрядной камеры: диаметр 650 мм, рабочая высота 750 мм. Применялись два типа газовых сред: N75Ar25 и N10Ar90. Для исключения влияния переменного характера тока на точность фиксации электрических параметров разряда в блоке питания применен фильтр. Стабилизация проводилась по температуре поверхности детали, напряжение и ток фиксировались после выдержки неизменной

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
температуры в течение 10 минут. Давление в разрядной камере варьировался в пределах от 0,5 до 8 тор (при условии, что в конкретных условиях разряд существовал как аномальный тлеющий).

При средних значениях коэффициентов вторичной электронной эмиссии порядка 0,01 тождественность экспериментальных и расчетных значений плотности электронного тока обеспечивалась путем коррекции концентрации электронов с помощью коэффициентов в пределах 1,04...1,09, что свидетельствует о принципиальной приемлемости применения разработанной аналитической модели формирования потока заряженных частиц к реальным газоразрядным процессам модификации поверхности металлов.

### ***1.3.2. Электрические параметры реальных процессов***

В предыдущем разделе исследована методология расчета характеристик разряда с целью, прежде всего, завершения первой подзадачи процесса – формирования потока заряженных частиц в газовом промежутке. Электрические характеристики газоразрядных процессов имеют решающее влияние не только на энергетические параметры оборудования для реализации ВДГРТ модификации поверхности металлов, но и на их экономические показатели, поскольку доля затрат на электроэнергию в общей стоимости обработки металлических деталей, рассчитанной для условий исследовательского производства при норме накладных затрат около 14%, составляет 24...31%.

Прежде всего, следует заметить, что приведенный в этом разделе материал отличается от классических вольтамперных характеристик ЭРГ прежде всего тем, что показатели тока и напряжения регистрировались при определенных фиксированных температурах, принятых согласно требованиям технологических режимов модификации поверхности, в свою очередь выбранных по критерию достижения нужных конечных результатов, т.е. речь идет об энергетической стороне процессов на реальном оборудовании. Кроме прогнозирования энергетических показателей технологического процесса данные применялись для сопоставления теоретических моделей формирования падающего потока частиц с реальными характеристиками ЭРГ, поскольку в этом случае нужны аналитические зависимости, в которые входили бы напряженность поля в области катодного падения напряжения (ОКП), плотность тока, который практически полностью является током электронным,

температура катоду, давление и состав газовой среды (см. предыдущий раздел). Исследования выполнялись на промышленной установке АТР типа ИПА1512 (однокамерная с номинальным диаметром 500 мм та длиной рабочего пространства 1200 мм).

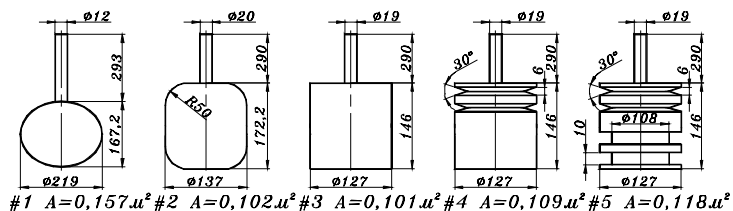


Рис.1.27. Конструкция та основные характеристики экспериментальных деталей (после номера указана активная площадь)

Обрабатывались специальные детали-эталоны из среднеуглеродистой стали без локальных исключений формы, которые могли бы служить причиной концентрации поля, а также такие, в которых предполагались подобные локальные исключения (узкие пазы, в том числе - клинообразной формы, острые ребра и т.п.), и, соответственно, концентрация поля. Конструкция деталей, применяемых в экспериментах, показанная на рис. 1.27.

Для обоснования номинальных электрических параметров блока питания установок прежде всего имеет значение потенциал перехода темного разряда в нормальный тлеющий. Значение этого потенциала зависит от давления в разрядной камере, состава газовой среды и, в некоторой мере, от особенностей формы обрабатываемых деталей, в меньшей мере - от конструктивных особенностей разрядных камер. Последнее касается в основном качества обработки внутренних поверхностей анода или анодного экрана, наличия на внутренних поверхностях камеры и приспособлений для устанавливания или подвешивания объектов обработки локальных исключений, которые могли служить причиной концентрации поля, провоцировать появление анодных пятен, что в дальнейшем приводило бы к переходу в дуговой разряд. Если абстрагироваться от факторов некачественного изготовления камер как таких, которые в условиях нормального производства можно считать недопустимыми, то установлена четкая зависимость между давлением в камере и потенциалом перехода в тлеющий разряд (ППТР). При коэффициентах корреляции в пределах 0,932...0,998 эти зависимости могут аппроксимироваться линейно при значениях давления от 0,01 до 2 тор, что отвечает параметрам технологических

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
 режимов, наиболее приемлемым в практике модификации. Отдельно обрабатывались результаты, полученные для азотно-аргоновых (N-Ar) и азотно-аргоно-водородных (N-Ar-H) сред. Последнее связано с тем, что поведение водорода в составе рабочих газовых сред несколько специфическое, поскольку этот компонент прежде всего имеет способность к связыванию вредных компонентов, например - кислорода. В составе же гидратных соединений участие водорода в элементарных подпроцессах, которые имеют место в прикатодной области, существенно может отличаться в сравнении с поведением атомарного или молекулярного водорода.

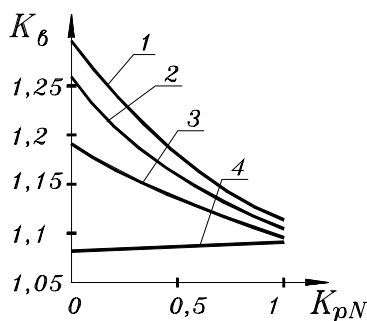
Для сред типа N-Ar при колебании коэффициента корреляции в пределах 0,825...0,897 соответственно и давлении 0,1...2 тор ППТР может определяться по формуле

$$U_{ППТР} = (267,525 + 362,499p) + (24,3 + 433,2p)K_{pN}, \quad (1)$$

где  $K_{pN}$  – коэффициент объемной доли азота в газовой среде ( $K_{pN}=0...1$ ).

Формула (1) касается деталей №1 и 2 (без концентраторов поля). Для деталей с локальными исключениями (№3, 4, 5) ППТР выше и рассчитывается (коэффициент корреляции в пределах 0,889...0,978)

$$U_{ППТР} = (274,824 + 516,53p) + (43,2 + 382,4p)K_{pN} \quad (2)$$



*Рис. 1.28. Характер изменения отношения ППТР для деталей с концентраторами и без них при давлении в камере: 1- 2 тора; 2- 1 тор; 3- 0,5 тора; 4- 0,1 тора*

Отношение ППТР для деталей с концентраторами и без них  $K_с$  зависит как от давления в камере, так и от объемной доли азота в смеси типа N-Ar. Характер изменения коэффициента отношения показано на рис. 1.28. Наиболее существенно изменение давления влияет на отношение для чисто аргоновых сред ( $K_с = 1,075...1,325$  соответственно для давлений  $p=0,1...2$  тора), меньше всего – для чисто азотных ( $K_с = 1,1...1,125$ ). Наиболее приемлемым объяснением повышения

ППТР для деталей с концентраторами может быть то, что характер разряда – нормальный, аномальный или дуговой определяется

плотностью тока. Наличие концентраторов поля приводит к неравномерному распределению плотности тока на поверхности катода, повышение ее в местах локальных исключений, или, при постоянном значении катодного падения напряжения – к относительному снижению на других участках поверхности. Это равнозначно уменьшению интенсивности всех ионизационных процессов, поэтому для перехода в тлеющий разряд необходимо повысить межэлектродный потенциал. Кроме того поскольку сечение ударной ионизации для аргона больше, чем для азота, то с увеличением концентрации аргона ионизационные процессы интенсифицируются, что и способствует изменению отношения  $K_6$  в большей мере.

Среды типа N-Ar-H сложнее анализировать на предмет установления общей зависимости, так как смеси в пределах реально применяемых могут быть с разным соотношением азота, аргона и водорода, в том числе и двойные по количеству компонентов (типа N-H). Поскольку в значительной степени все процессы в ОКП обязаны прежде всего ионизационным явлениям, то логически было бы применить как универсальный аргумент функций параметр, который наиболее точно определял интенсивность этих процессов. Выше была установлена возможность введения параметра  $\sigma_\Sigma$ , который назван приведенным интегральным сечением ионизации.

Обработка известных данных по сечениям ионизации [2-6] дает значение интегральных или приведенных интегральных сечений ударной ионизации для отдельных компонентов и типичных газовых сред: N100 - 30,81; Ar100 - 41,97; H100 - 8,925; N10Ar90-40,85; N25Ar75 - 39,18; N50Ar50-36,39; N75Ar25-33,6; N75Ar20H5-31,95; N75Ar23H2-32,94; N75Ar15H10-30,3; N90Ar10-31,93; N90H10-29,62; N95H5-29,72; N98H2-30,37.

Тогда полученные экспериментальные данные ППТР с коэффициентом корреляции в пределах 0,829...0,916 аппроксимируются линейной зависимостью

$$U_{ППТР} = (189,148 + 1724 p) - (32,986 p - 3,674) \sigma_\Sigma \quad (3)$$

По аналогичной методике аппроксимируются данные ППТР для деталей без концентраторов (№1 и 2, коэффициент корреляции 0,825...0,897) и с ними (№3-5, коэффициент корреляции 0,889...0,978), т.е. вместо формул (1) и (2) можно использовать соответственно (4) и (5)

$$U_{ППТР} = (358,972 + 1992 p) - (38,827 p + 2,179) \sigma_\Sigma \quad (4)$$

$$U_{ППТР} = (437,133 + 1956 p) - (34,267 p - 3,868) \sigma_\Sigma \quad (5)$$

Характер изменения отношения ППТР, рассчитанных по

формулам (1) и (3) качественно похож на рис. 1.28, тем не менее

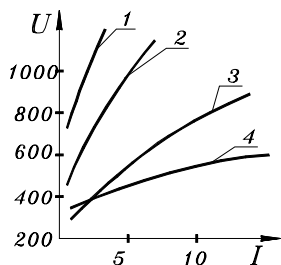


Рис. 1.29. Типовые зависимости между током и напряжением разряда при давлении: 1- 0,5 тор; 2- 1 тор; 3- 2 тора; 4- 4 тора

значение коэффициентов отношения изменяются в более узком диапазоне. Например, для смесей типа N-N и давлений в камере  $p=0,1...2$  тора  $K_e=1,025...1,11$ , а для смесей N-Ar  $K_e=0,88...0,98$ , что указывает на универсальность методики расчета ППТР с использованием параметра приведенного интегрального сечения ионизации. Качественный вид зависимостей между током и напряжением разряда при разном давлении в разрядной камере показано на рис. 1.29., из которого можно сделать вывод, что в

большинстве случаев при значениях давления в разрядной камере и плотности тока, соответствующих диапазону наиболее употребляемых, эти зависимости аппроксимируются линейно. При этом следует учесть, что плотность тока в экспериментах колебалась от 3,5 до 140 А/м<sup>2</sup> (в зависимости от типа детали), в то же время обычная, характерная для преимущественно всех типичных технологических режимов, плотность тока разряда находится в пределах 10...20 А/м<sup>2</sup>.

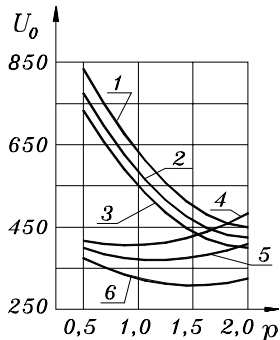


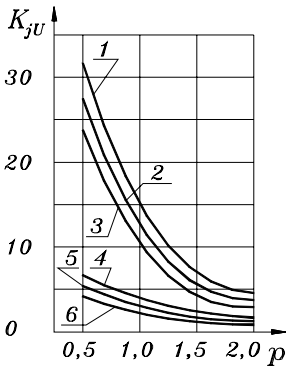
Рис. 1.30. Зависимость опорного напряжения от давления для сред: 1 – N100, T=500°C, 2 – N75Ar25, T=500°C, 3 – N25Ar75, T=500°C, 4 – N100, T=35°C, 5 – N75Ar25, T=35°C, 6 – N25Ar75, T=35°C

В общем случае линейные зависимости между плотностью тока разряда  $j$  и напряжением разряда  $U$  могут определяться двумя параметрами: напряжением для выбранной опорной точки  $U_0$  (например – при минимальной плотности тока, принятой в данных экспериментах, ориентированной на нижнюю границу типичных параметров модификации, указанных выше, исходя из общего тока разряда 0,5 А) и коэффициентом отношения

изменения напряжения к изменению плотности тока  $K_j$  ( $\text{В} \cdot \text{м}^2/\text{А}$ ), который фактически является коэффициентом наклона функции линейного вида. Установлено, что опорное напряжение  $U_0$  зависит от давления в камере и температуры катода. Характер изменения опорного напряжения в зависимости от давления в камере показано для разных видов сред и температуры на рис. 1.30. Типичной особенностью, которая наиболее четко отслеживается для газовых сред с преобладающим содержанием азота, есть наличие минимума напряжения опорной точки при изменении давления. В пределах параметров, которые были приняты в экспериментах, учитывая реально применяемые, минимумы напряжения четко отслеживаются при низких температурах. С уменьшением объемной доли азота в газовой среде точка экстремума смещается в область больших давлений, а для газовых смесей с превосходящим содержанием азота она соответствует давлениям порядка 0,75...1 тор. Как уже упоминалось выше при исследовании скорости электронов, точки экстремумов там также находились примерно в той же области давлений, что свидетельствует о наличии причинно-следственной связи между скоростью электронов и электрическими параметрами реальных ЭРГ. Это обстоятельство следует учитывать при проектировании технологического режима в части фазы выхода на рабочую температуру и проводить ее именно при таких давлениях в разрядной камере, которое будет оказывать содействие при номинальной плотности тока (а именно она является движущим фактором процесса нагревания деталей) минимальной мощности. Кроме того, нужно исследовать целесообразность использования смесей с преобладающим содержанием аргона, для которых большая плотность тока достигается при меньших напряжениях. Из рис. 1.29 видно, что опорное напряжение малых токов для давления  $p=4$  тора больше, чем для  $p=2$  тора. Наличие минимума напряжения зависит не только от состава газовой среды, но также от температуры катода. Например, при температуре детали близкой к комнатной (начальная фаза процесса) повышение напряжения малых токов наблюдается уже при давлении  $p=2$  тора. В тот же время при рабочих температурах модификации порядка 400°...600°С в пределах исследуемых давлений подобного повышения нет.

Возможным объяснением наличия экстремальных точек минимума напряжения может быть тезис о взаимном перекрытии газокинетических сечений частиц в газовой среде. Действительно, поскольку характеристики вероятности столкновений электронов с частицами в газовой среде, в котором проходит электрический разряд, прежде всего зависят от суммарного газокинетического

сечения частиц, то этот фактор (с учетом влияния энергии электронов) имеет решающее значение и для ионизационных процессов. Если рассматривать некоторый объем газа в направлении поля (перпендикулярно поверхности катода и от нее), то отношение суммы проекций всех газокинетических сечений частиц к площади основы объема и представляет вероятность столкновений. С увеличением давления (количества частиц в объеме) к определенной границе вероятность столкновений возрастает (активизируются ионизационные подпроцессы, плотность тока достигается при относительно меньших напряжениях). В дальнейшем некоторые частицы в какой-то мере взаимно перекрываются и рост интенсивности ионизации непропорционально увеличению числа частиц. Повышенная ионизационная активность аргона в определенной мере сглаживает эффект перекрытия, поэтому для сред с превосходящим содержанием этого компонента экстремумы минимума отсележиваются менее четко и смешаются в сторону больших давлений. Аналогично влияет и температура, поскольку при одинаковом давлении и большей температуре количество частиц в объеме уменьшается, поэтому опорное напряжение возрастает, хотя строгой пропорциональности в этом случае быть не может, поскольку с ростом температуры (энергий) частиц газа они



*Рис. 1.31. Зависимость отношения напряжения к плотности тока от давления: 1 – N100, T=500°C, 2 – N75Ar25, T=500°C, 3 – N25Ar75, T=500°C, 4 – N100, T=35°C, 5 – N75Ar25, T=35°C, 6 – N25Ar75, T=35°C*

становятся более подвижными и фактор перекрытия газокинетических сечений несколько снижается.

При всех вариантах состава газовых сред и температур с ростом давления крутизна (коэффициент отношения  $K_j$ ) зависимостей уменьшается.

Характерные зависимости коэффициента  $K_j$  приведенные на рис. 1.31. Анализ графиков на рис. 1.30 и 1.31 подтверждает вывод об основоположном значении подпроцессов ионизации (прежде всего - ударной) для формирования всех электрических параметров ЭРГ, применяемого для ВДГРТ модификации поверхности металлов. Действительно, уже отмеченная выше большая



ионизационная активность аргона (интегральное сечение ударной ионизации приблизительно на 35% большей, чем для азота) в случае увеличения его концентрации приводит к тому, что одна и та же плотность тока достигается при меньших значениях напряжения разряда. По этой же причине для сред с повышенным содержанием азота характерны большие значения коэффициентов отношения напряжения к плотности тока, т.е. в более азотосодержащих смесях достижение определенной плотности тока возможно при относительно больших значениях напряжения. Этот же вывод подтверждает правомерность использования в качестве аргумента зависимостей характеристик электрического разряда предложенного выше приведенного интегрального сечения ударной ионизации. Обработка массива экспериментальных данных позволила установить зависимости между опорным напряжением, крутизной и приведенным интегральным сечением ударной ионизации, при этом значения коэффициентов корреляции колебались в пределах 0,71...0,96 (лучшие значения соответствуют высшим значениям температуры - 500°С).

Общая форма означенных зависимостей имеет вид:

для опорного напряжения (при токе  $I=0,5$  А)

$$U_0(\sigma) = a_U - b_U \sigma_\Sigma, \quad (8)$$

для крутизны, определяемой как коэффициент отношения изменения напряжения к изменению плотности тока

$$K_{jU}(\sigma) = a_K - b_K \sigma_\Sigma, \quad (9)$$

где  $a_U$ ,  $b_U$ ,  $a_K$ ,  $b_K$  – числовые коэффициенты, значения которых приведены в табл. 1.8.

Таблица 1.8

**Числовые коэффициента для определения опорного напряжения и крутизны зависимостей**

Температура катода, °С	Давление в камере, тор	Числовые коэффициенты			
		$a$	$b$	$a$	$b$
35	0.5	591.393	4.737	20.422	0.425
	1.0	517.383	4.886	5.731	0.098
	2.0	746.986	10.777	2.186	0.029
500	0.5	1029	7.836	62.943	0.966
	1.0	601.101	2.245	28.066	0.514
	2.0	564.932	4.567	10.534	0.189

Обобщенные зависимости опорного напряжения от давления и приведенного интегрального сечения ударной ионизации для низких температур лучше аппроксимируются полиномом второй степени,

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
 опорного напряжения при высокой температуре и крутизны для всех температур - показательной функцией и имеют для данных, полученных в экспериментах, вид (в обозначении последний индекс указывает на температуру)

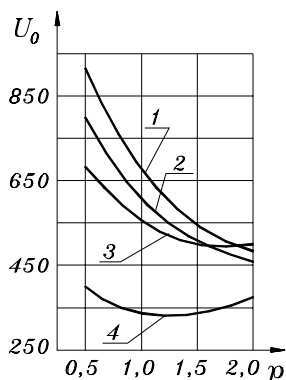
$$U_{025}(p, \sigma) = (791,283 - 6,452\sigma) - (525,651 - 5,295\sigma)p + (251,751 - 3,729\sigma)p^2, \quad (10)$$

$$U_{0500}(p, \sigma) = (701,454 - 4,572\sigma)p^{-(0,513-0,00134\sigma)}, \quad (11)$$

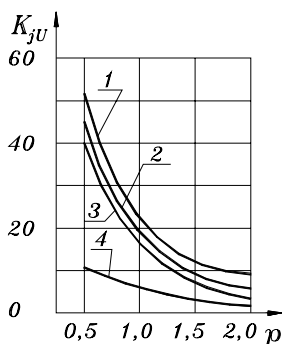
$$K_{jU35}(p, \sigma) = (6,29 - 0,111\sigma)p^{-(3,111-0,056\sigma)}, \quad (12)$$

$$K_{jU500}(p, \sigma) = (27,532 - 0,493\sigma)p^{-(0,661+0,024\sigma)} \quad (13)$$

Повышение температуры катода, а, соответственно при установившемся температурном режиме, и температуры газовой компоненты среды, для неизменного давления равнозначно уменьшению количества частиц. Поэтому логичным есть повышение



*Рис. 1.32. Зависимость опорного напряжения от температуры для N100: 1 – T=600°C, 2 – T=500°C, 3 – T=400°C, 4 – T=35°C*



*Рис. 1.33. Зависимость коэффициента крутизны от температуры для N100: 1 – T=600°C, 2 – T=500°C, 3 – T=400°C, 4 – T=35°C*

опорного напряжения, хотя оно не пропорционально снижению числа частиц, которые потенциально могут принимать участие в ионизационных процессах. Этот факт объясняется ростом роли других подпроцессов и, прежде всего, усилению термозлектронной эмиссии с поверхности катода. Комбинация хотя бы этих двух факторов должна была бы приводить к нелинейному характеру влияния температуры катода и газовой компоненты на электрические характеристики разряда, что и демонстрируется рис. 1.32 и 1.33.

Несколько большие абсолютные значения напряжения на рис.

1.32 в сравнении с рис. 1.30 объясняются тем, что эксперименты по влиянию температуры проводились на детали с локальными исключениями (концентраторами поля). Рис. 1.32 подтверждает отмеченные прежде тенденции влияния температуры на характер зависимостей: со снижением температуры все четче отслеживается экстремум минимума опорного напряжения. По этой причине соотношения значений напряжения при разном давлении переменное при разных давлениях. Для коэффициента крутизны (рис. 1.33) разность значений приблизительно пропорциональна изменению температуры. Учитывая это, целесообразно с целью упрощения методики ограничиться узким диапазоном температур, который отвечает рабочим температурам процесса модификации - 400...600°C. Тогда при определении опорного напряжения и коэффициента крутизны необходимо ввести коэффициент коррекции относительно зависимостей для температуры 500°C, формулы (11), (13).

$$U_{от} = U_{0500} \cdot K_{TU}, \quad (14)$$

$$K_{jUT} = K_{jU500} \cdot K_{TK}, \quad (15)$$

где  $K_{TU}$ ,  $K_{TK}$  – температурные коэффициенты коррекции соответственно для опорного напряжения и коэффициента крутизны, которые определяются

$$K_{TU} = (0,48 + 0,36p) + (0,0011 - 0,000704p) \cdot T, \quad (16)$$

$$K_{TK} = (0,82 - 0,78p) + (0,0004 + 0,0017p) \cdot T \quad (17)$$

Приведенные данные могут быть использованы как для определения номинальных электрических параметров блоков питания оборудования для ВДГРТ модификации поверхности металлов, так и для сравнения данных аналитической модели электрических характеристик разряда, о чем речь шла в предыдущем разделе. В основе формирования электрических характеристик лежат ионизационные подпроцессы в ОКП, что свидетельствует о возможности использования единого аргумента функций зависимостей - приведенного интегрального сечения ударной ионизации частиц газа электронами.

### ***1.3.3. Особенности моделей многофакторных систем***

В предыдущих разделах данные экспериментов необходимо было предварительно систематизировать с целью создания аналитической модели того или иного процесса. С этой целью была предложена методика обработки экспериментальных или расчетных

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
 данных на основе последовательного исключения факторов влияния и формирование аналитической модели в виде системы параметрических уравнений или, что применяется значительно реже в связи с громоздкостью выражений, одной формулы [11]. Таким образом, полученная система уравнений, которая и является моделью процесса, в самом общем варианте имеет вид

$$M = M(f_1, f_2 \dots f_z), \quad (1)$$

где  $f_1, f_2 \dots f_z$  – факторы влияния, количество которых  $z$ .

Практическое использование упомянутой методики с применением вычислительной системы MathCAD2000 для решения задач разного типа показало как ее эффективность при высокой точности соответствия результатов вычисления начальным данным (например для моделей с четырьмя факторами влияния отклонение в подавляющем большинстве случаев не превышало 5% по всему массиву пятимерного пространства), так и необходимость ее усовершенствования с целью по возможности возможного упрощения конечного вида модели. Прежде всего это касается тех моделей, имеющих весьма сложный вид, который возможно упростить практически без потери достигнутой точности отображения действительности. Существенную роль при этом сыграет выбранный вид начальной зависимости. Обычно он в первую очередь обуславливается логикой изменения явления в зависимости от вариаций факторов влияния. Желание по возможности точнее отобразить их влияние на конечные результаты служит причиной роста количества коэффициентов в уравнениях, каждый из которых в дальнейшем нужно через систему зависимостей связать последовательно со всеми факторами влияния. Таким образом, общая структура модели, сформированной на основе полиномов, будет сводиться к следующему

$$\begin{aligned} M(f_1, f_2 \dots f_z) &= a_0 + a_1 f_1 + a_2 f_1^2 + \dots + a_n f_1^n \\ a_0(f_2, f_3 \dots f_z) &= b_{00} + b_{01} f_2 + b_{02} f_2^2 + \dots + b_{0m0} f_2^{m0} \\ a_1(f_2, f_3 \dots f_z) &= b_{10} + b_{11} f_2 + b_{12} f_2^2 + \dots + b_{1m1} f_2^{m1} \\ &\dots \\ a_n(f_2, f_3 \dots f_z) &= b_{n0} + b_{n1} f_2 + b_{n2} f_2^2 + \dots + b_{nmm} f_2^{mm} \\ b_{00}(f_3, f_4 \dots f_z) &= c_{00} + c_{01} f_3 + c_{02} f_3^2 + \dots + c_{0r0} f_3^{r0} \\ b_{01}(f_3, f_4 \dots f_z) &= c_{10} + c_{11} f_3 + c_{12} f_3^2 + \dots + c_{0r1} f_3^{r1} \\ &\dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \dots \\
 & b_{nm} (f_3, f_4 \dots f_z) = c_{n0} + c_{n1} f_3 + c_{n2} f_3^2 + \dots + c_{nrn} f_3^{rn} \\
 & \dots \\
 & v_{00} (f_z) = u_{00} + u_{01} f_z + u_{02} f_z^2 + \dots + u_{0q0} f_z^{q0} \\
 & v_{01} (f_z) = u_{10} + u_{11} f_z + u_{12} f_z^2 + \dots + u_{1q1} f_z^{q1} \\
 & \dots \\
 & v_{pqp} (f_z) = u_{p10} + u_{p1} f_z + u_{p2} f_z^2 + \dots + u_{pqp} f_z^{qp}
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $a, b, c, \dots, v, u$  – коэффициенты системы уравнений,

$n, m_0, m_1 \dots m_n, r_0, r_1, \dots, r_n, p, q_0, q_1, \dots, q_p$  – порядок уравнений, которые определяют параметры модели в целом и составляющие коэффициенты.

Главный конфликт методики последовательного исключения факторов заключается в том, что для повышения точности отображения явления моделью следует увеличивать количество коэффициентов в начальном уравнении, которое неизбежно приводит к резкому увеличению числа коэффициентов, а, соответственно, к усложнению модели. Конечно, использование современных вычислительных систем разрешает обрабатывать сколь угодно сложные системы уравнений, тем не менее для анализа влияния факторов, а также при использовании подобных усложненных моделей с целью управления процессом крайне желательно по мере возможного их упростить.

Сама методика последовательного исключения имеет некоторые резервы относительно упрощения конфигурации модели. Прежде всего, к ним относится последовательность исключения факторов. Очевидно, что когда в первую очередь исключать факторы, влияние которых характеризуется более простыми зависимостями, то общее количество коэффициентов может существенно уменьшиться. Кроме того, важную роль играет вид и порядок уравнений, с помощью которых коэффициенты определяются через факторы влияния. Тем не менее, этим методом не следует злоупотреблять, особенно на последних стадиях исключения, поскольку накопленная погрешность может сделать модель практически не применимой в связи с недопустимо низкой точностью.

Далее изложен метод упрощения модели многофакторного процесса, который базируется на принципе использования

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*

приоритетной области значений коэффициентов. Суть понятия приоритетной области значений коэффициентов вытекает из того факта, который при увеличении количества коэффициентов начального уравнения одновременно увеличивается количество приблизительно равноценных с точки зрения точности модели комбинаций этих коэффициентов. Другими словами одна и та же графическая зависимость может быть смоделирована уравнениями одного вида, но с разным подбором коэффициентов. Известно, что точность регрессии зависимости произвольного порядка может характеризоваться корреляционным отношением К. Пирсона [13].

Используя стандартную для MathCAD2000 процедуру на основе функции  $genfit(vx, vy, vg, F)$  [14], следует иметь в виду, что полученные с ее помощью коэффициенты подобраны из условия максимального значения корреляционного отношения. Тем не менее, практика моделирования с помощью этой функции, а также в некоторой мере - с использованием полиномиальной регрессии, подтверждает, что в большинстве случаев между отдельными коэффициентами наблюдается более или менее стойкая корреляция. В тот же время критерий максимального корреляционного отношения искусственно переводит некоторые группы коэффициентов в отдельные регионы возможного ареала существования. Определенная часть комбинаций коэффициентов формирует область с четкой корреляцией между ними, которую собственно и назовем приоритетной областью значений.

Принцип использования приоритетной области состоит в установлении зависимости между отдельными группами коэффициентов, которые базируются в приоритетной области, и распространении этой связи на другие комбинации коэффициентов, которые до этого не входили в приоритетную область. В таком случае дальше есть необходимость аналитически сформулировать связь факторов влияния только с одним из коэффициентов (например в уравнении (2) – только для коэффициента  $a_0$ ), другие коэффициенты определяются на основе уравнений корреляционной связи между коэффициентами.

Объясним принцип использования приоритетной области на конкретном примере. Пусть необходимо разработать модель значения среднего угла вхождения в столкновение положительно заряженной частицы, которая движется в электрическом поле, с другой нейтральной частицей (условно неподвижной). Эта задача будет актуальна для последующих разделов настоящей главы. Поскольку все углы вылета из предыдущего столкновения равновероятны, то схема возможных траекторий движения

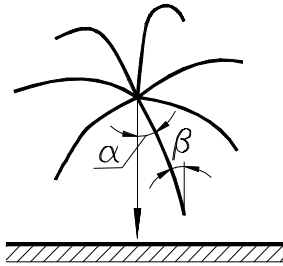


Рис. 1.34. Схема траекторий движения заряженной частицы в электрическом поле

заряженной частицы иллюстрируется рис. 1.34. Длина траектории движения к следующему столкновению ограничена длиной свободного пробега, которая в свою очередь зависит от вида и состава газовой среды, его характеристик, а также параметров режима обработки. Заряженная частица, вылетевшая из предыдущего столкновения под углом  $\alpha$  относительно вектора поля, направленного в сторону заштрихованного катода, с некоторой скоростью  $V$ , под

действием поля изменяет направление движения, одновременно меняется составляющая скорости вдоль вектора поля. Таким образом, средний угол входа в следующее столкновение как среднее значение углов  $\bar{\beta}$  в диапазоне  $0 \dots \pi$ , зависит не только от скорости  $V$ , но и от давления  $p$ , межэлектродного потенциала  $U$ , плотности тока  $j$ , при этом условно считаем, что температура постоянная (что для иллюстрации метода роли не играет). Типичная зависимость средних значений угла входа в столкновение  $\bar{\beta}$ , которые рассчитаны по специальной методике, от скорости  $V$  наиболее удачно может моделироваться

$$M(V) = E(V) - F(V) = 90 \cdot (1 - a^{-V}) - b \cdot V^c e^{-dV^k} \quad (3)$$

и включает пять начальных коэффициентов. Если исходить из того, что более или менее точно связь этих и производных от них коэффициентов будет описана полиномами второй степени, то в нашем случае общее количество коэффициентов модели будет составлять 135. Для упрощения модели, во-первых, можно воспользоваться приведенной выше рекомендацией относительно вида начального уравнения. Действительно практика моделирования показала, что уравнение (3) без заметного снижения точности можно упростить, положив  $c=1$ , а  $d=0,1$ . Тогда начальное уравнение приобретет вид (с сохранением алфавитной последовательности обозначений коэффициентов)

$$M(V) = 90 \cdot (1 - a^{-V}) - b \cdot V e^{-0,1V^k} \quad (4)$$

Дальше порядок обработки данных следующий. В зависимости от количества градаций изменения факторов влияния с помощью

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*

функции  $genfit(vx,vy,vg,F)$  составляются матрицы значений коэффициентов, число которых зависит от числа градаций изменения факторов и их группирование. Например, в нашей задаче установлено по три градации давления  $p$ , межэлектродного потенциала  $U$ , плотности тока  $j$ , причем данные группировались по системе: три варианта плотности тока при трех потенциалах при трех значениях давления, всего 9 матриц, хотя весь расчетный материал может иметь форму одной таблицы. Следующая операция заключается в анализе соотношений между массивами отдельных коэффициентов на предмет установления возможной корреляционной зависимости. Для этого достаточно по всем матрицам значений коэффициентов с помощью простого программного модуля сформировать массивы координат точек, которыми и будут значения групп коэффициентов, одни из которых откладываются на оси ординат, другие – на оси абсцисс. Полученная картина обнаруживает группу комбинаций коэффициентов, которые четко укладываются в корреляционную зависимость между собой. Это и есть область приоритетных значений. Все другие комбинации исключаются из начальных матриц, дальше для комбинаций, которые входят в приоритетную область устанавливаются зависимости взаимосвязи. Интересно, что те комбинации, которые выпадают из области приоритетных значений для одного варианта совокупности коэффициентов, выпадают аналогично и для других, т.е. в нашем случае если проводится сопоставление коэффициентов  $a$  и  $b$ , то исключенные здесь комбинации значений будут находиться вне границ области приоритетных значений и для сопоставления  $a$  с  $c$ , и для  $b$  с  $c$ . В результате этой фазы исследований будут установлены зависимости между коэффициентами, в нашем случае – это линейные зависимости вида

$$b(a) = b_0 + k_{ba}a \quad (5)$$

$$c(a) = c_0 + k_{ca}a \quad (6)$$

Следует заметить, что выбор коэффициента в качестве аргумента существенной роли не играет. Часто здесь руководствуются абсолютными значениями изменения коэффициента, например, если с трех коэффициентов один значительно меньше нуля при других больше нуля, то его не следует брать в качестве аргумента, так как в противном случае возникнет необходимость расчета значений этого параметра с чрезвычайно высокой точностью.

Таким образом, нам удалось из группы коэффициентов, входящих в начальное уравнение, для дальнейшего исследования их



связи с факторами влияния отделить только один, что существенно упростит вид модели. Выше отмечалось, что последовательность исключения факторов, а именно таким методом будут проводиться дальнейшие исследования модели, сыграет значительную роль в ее формировании. Здесь очень важно для выбора типа начальной зависимости учитывать реальный характер изменения параметров модели. В исследуемом примере принят первым параметром исключения межэлектродный потенциал  $U$ . При этом учтено то, что при  $U=0$  все частицы после вылета с любой скоростью  $V$  в связи с отсутствием электрического поля будут двигаться прямолинейно, а поскольку, как отмечалось выше, все углы вылета  $\alpha$  равновероятны, то среднее значение угла входа в следующее столкновение  $\bar{\beta} = 90^\circ$ , а это согласно уравнению (4) возможно при  $a=0$  и  $b=0$ . Это обстоятельство и будет учтено при выборе опорной точки для интерполяции значений коэффициента  $a$ . Уточненный расчет всех значений коэффициентов выполняется с помощью программного модуля. После составления уточненной матрицы значений коэффициентов начального уравнения дальнейшие исследования зависимости ведущего из них от факторов влияния проводятся соответственно рекомендациям [11]. Вывод относительно эффективности предложенной методики можно сделать, если привести уравнение модели задачи, взятой нами в качестве примера (дополнительно к формулам (4)...(6)).

$$Kp1(P) = 0,01566 - 0,0275 \cdot P + 0,01891 \cdot P^2$$

$$Kp2(P) = 0,0000175 + 0,002853 \cdot P - 0,002676 \cdot P^2 \quad (10)$$

$$Kp3(P) = -0,00000054 - 0,0001264 \cdot P + 0,0001213 \cdot P^2$$

$$aj1(P, j) = Kp1(P) + Kp2(P) \cdot j + Kp3(P) \cdot j^2$$

$$aj2(P, j) = 0,000008341 - 0,001776 \cdot aj1(P, j)$$

$$a = aj1(P, j) \cdot U + aj2(P, j) \cdot U^2$$

т.е. вместо системы уравнений с 135 коэффициентами (смотри формулу (2)) модель включает только 9 уравнений, что подтверждает приемлемость метода в практике научных исследований. При этом отклонение характеристик, определенных по этой модели, от исходных данных не превышает 5%.

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Пастух И. М. Факторы управляемости вакуумно-диффузионными газоразрядными технологиями модификации поверхности металлов. – Хмельницкий: Проблемы трибології; - 2001; - №2; С. 93-96.

2. Мирдель Г. Электрофизика/ Пер. с нем. по ред. В.И. Раховского. – М.: Мир, 1972. – С. 191.

3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 535 с.
4. Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982. – 375 с.
5. Вайнштейн Л. А., Собельман И. И., Юков Е. А. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. – М.: Наука, 1979. – 320 с.
6. Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов. – М.: Наука, 1980. –416 с.
7. Смирнов Б. М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат, 1974, с. 456.
8. Смирнов Б. М. Введение в физику плазмы. М.: Наука, 1982, с. 224.
9. Смирнов Б. М. Физика слабоионизованного газа. М.: Наука, 1978, с. 416.
10. Пастух І. М. Алгоритми та компоненти моделювання газорозрядних процесів вакуумно-дифузійних технологій. – Хмельницький: Вісник технологічного університету Поділля; - 2001; - №5, С. 99-107.
11. Пастух І. М. Методика обробки даних багатофакторних моделей. – Хмельницький: Вісник технологічного університету Поділля; - 2002; - №6, С. 42-46.
12. Пастух І. М. Процеси вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій модифікації поверхні металевих сплавів. – Хмельницький: Вісник ТУП;- 2000;- №6; С. 124-135.
13. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. –М.: Наука, 1965. – 512 с.
14. Кирьянов В. Д. Самоучитель MathCAD 2001. –СПб.: БХВ-Петербург. 2001.- 544 с.

## 1.4 Энергетика частиц падающего потока

### 1.4.1. Кинетика прикатодных процессов

Взаимодействие газовой среды с поверхностью в процессе ее модификации в значительной мере зависит не только от состава частиц, бомбардирующих эту поверхность, но также и от энергетического спектра падающего потока (ЭСПП). В наиболее обобщенном виде частицы, достигающие поверхности и имеющие энергию, существенно отличную от энергии теплового движения, можно разделить на заряженные и нейтральные, каждая из которых могут достигать поверхности без столкновений на пути к катоду или с подобными столкновениями. Такой подход упрощает дальнейшую разработку аналитической модели энергетике всех процессов, имеющих место на границе газ-поверхность. Энергия частиц бесстолкновительного движения определяется в зависимости от координаты начала движения в ОКП под действием электрического поля, а она в свою очередь является функцией интенсивности ионизационных, рекомбинационных, резонансных и других элементарных процессов в ОКП, а также вероятности бесстолкновительного движения. Большую сложность с точки зрения методики их учета имеют процессы, обусловленные следствиями столкновений частиц, особенно когда речь идет о столкновениях заряженных частиц с нейтральными (вероятность столкновений между заряженными частицами в слабоионизированной плазме очень мала, а реальная степень ионизации относительно ВДГРТ по порядку  $\alpha=10^{-8} \dots 10^{-6}$ ) [1, 2]. Именно влияние кинетики заряженных частиц, двигающихся со столкновениями, в ОКП является темой этой части работы.

Поскольку задача ЭСПП принципиально важна для энерго- и массообмена между газовой средой и твердым телом, то этот вопрос рассматривается во многих работах по физике ЭРГ - [2, 3]. Общепринято считать, что распределение скоростей (соответственно - энергий) носителей зарядов в отсутствие поля подчиняется закону Максвелла - Больцмана. В тот же время не отрицается влияние на это распределение эффекта Сазерленда, согласно которому эффективное сечение столкновений зависит от энергии частицы. Тем не менее, столкновительный член в уравнении Максвелла - Больцмана впервые был рассчитан именно Максвеллом на основе модели твердых шаров. При этом были сознательно игнорированы такие явления как наличие в плазме электрических и магнитных полей самых носителей заряда, а также тот факт, что столкновения

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
не всегда носят упругий характер. Отмечается, что при столкновении нейтральных частиц эффективное сечение достаточно точно определяется именно на основе модели твердых шаров. Считается [3], что в технической плазме в первом приближении, которое приемлемо для прикладных задач, допустимо исходить именно из концепции модели упругих шаров. При необходимости эффективное сечение может быть откорректировано, исходя из того, что с ростом энергии заряженных частиц эффективное сечение столкновений уменьшается, а средняя длина свободного пробега (СДСП) возрастает. Имеет право на учет тезис, что при относительно больших энергиях сечение столкновений (взаимодействия) приближается к значениям, полученным с помощью модели упругих шаров [3, с. 200].

Тем не менее, недостаток методик общего вида заключается в том, что с их помощью тяжело, а часто - и невозможно, учитывать все тонкости влияния как параметров технологического режима, так и состава газовой среды. Кроме того, все вопросы энергетики частиц в ионизированном газе рассматриваются преимущественно относительно плазмы в классическом понимании этого слова, для которой характерна квазинейтральность, т.е. приблизительное равновесие зарядов разного знака. По этой причине выводы, полученные на основе подобных подходов тяжело применить без коррекции для ОКП, где квазинейтральность принципиально невозможна. Но для технологий модификации поверхности в тлеющем разряде именно процессы в ОКП имеют решающее значение. Предлагаемая методика базируется на мультипроцессной модели, которая учитывает основные элементарные подпроцессы, имеющие место в ОКП.

Для рассмотрения модели кинетики движения заряженной частицы в ОКП введем понятие прослойки свободного пробега (ПСП), под которым будем понимать слой ОКП, ширина которого равняется СДСП  $\bar{l}$ . Тогда, если предыдущее столкновение частицы имело место вне границ первого ПСП, то движение ее к катоду наиболее вероятно будет сопровождаться последующими столкновениями. При этом, как это классифицировалось в начале раздела, для участия в подобных процессах будут учитываться частицы падающего потока, как разность между общим потоком и потоком бесстолкновительного движения.

Движение ионов в электрическом поле демонстрируется рис. 1.35. Скорость движения иона по касательной к эквипотенциальной поверхности

$$\frac{dx}{dt} = V_x = V \cdot \cos(90 - \beta) = V \cdot \sin \beta, \quad (1)$$

а составляющая скорости вылета из предыдущего столкновения  $V$  в направлении катода

$$\frac{dy}{dt} = V_y = V \cdot \sin(90 - \beta) = V \cdot \cos \beta. \quad (2)$$

Поскольку сумма проекций сил на нормальное и касательное направления определяется как

$$\sum X_i = m_+ \frac{d^2 x}{dt^2} = 0, \quad (3)$$

$$\sum Y_i = m_+ \frac{d^2 y}{dt^2} = q_e E(y), \quad (4)$$

где  $q_e$  – элементарный заряд, номинально равный заряду электрона,

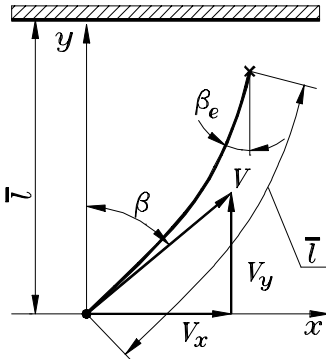


Рис. 1.35. Схема движения иона в электрическом поле

$E(y)$  – закон изменения напряженности поля в направлении нормали к катоду, то ускорение в двух взаимно перпендикулярных направлениях

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = 0, \quad \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{q_e E(y)}{m_+} \quad (5)$$

Двойное дифференцирование дает выражения для перемещений в двух направлениях

$$\frac{dx}{dt} = C_1, \quad x = C_1 t + C_2 \quad (6)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{q_e E(y)}{m_+} t + C_3, \quad y = \frac{q_e E(y)}{2m_+} t^2 + C_3 t + C_4 \quad (7)$$

Постоянные интегрирования определяются, если учесть, что при  $t=0$   $x=0$ ,  $y=0$ . Тогда  $C_1 = V \cdot \sin \beta$ ,  $C_2=0$ ,  $C_3 = V \cdot \cos \beta$ ,  $C_4=0$  и окончательно перемещение вдоль нормального и касательного направлений определяются как

$$x = Vt \sin \beta, \quad (8)$$

$$y = Vt \cos \beta + \frac{q_e E(y)}{2m_+} t^2 \quad (9)$$

При линейном законе изменения напряженности электрического поля [4] напряженность в любой точке ОКП определяется

$$E(y) = E_k \left( 1 - \frac{\bar{l} - y}{\delta} \right), \quad (10)$$

где  $E_k$  – напряженность поля возле катода,  $E_k = \frac{2U_k}{\delta}$ ,  $U_k$  – межэлектродный потенциал,  $\delta$  – ширина ОКП.

Угол входа в следующее столкновение  $\beta_e$ , в том числе – и с катодом, имеет существенное значение для прогнозирования дальнейшей кинетики частиц, а в последнем случае – для энергетики взаимодействия газа с поверхностью. В принципиальном плане зависимость этого угла от угла вылета  $\beta$  может определяться, исходя из двух наиболее весомых позиций: по периоду между столкновениями или с контролем траектории движению и ограничением ее СДСП. Период между столкновениями определяется через среднюю частоту столкновений  $\bar{v}_c$

$$t_c = 1/\bar{v}_c, \quad (11)$$

а средняя частота столкновений  $i$ -го компонента с частицами, общее количество которых  $z$ ,

$$\bar{v}_{ci} = C_p p \cdot \sum_1^z K_{pwz} \bar{V}_{+wz} \cdot \pi(r_i + r_z)^2, \quad (12)$$

где  $C_p$  – константа концентрации компонента,  $C_p = 1/kT$ ,  $k$  – потсоянная Больцмана,  $T$  – термодинамическая температура,  $p$  – давление в разрядной камере,

$K_{pwz}$  – коэффициент объемной доли компонента в газовой среде,

$\bar{V}_{+wz}$  – средняя скорость иона относительно произвольной частицы газа,

$r_i, r_z$  – радиусы соответствующих компонентов и частиц.

Типичные зависимости между углами вылета и входа в столкновение, рассчитанными по варианту с ограничением времени значением периода между столкновениями, показанные на рис. 1.36...1.38, причем на них соблюдены однотипные значения параметров технологического режима, представляющие для кривых: 1 – межэлектродный потенциал  $U=300\text{В}$ , плотность тока  $j=5 \text{ А/м}^2$ , давление  $p=0,5$  тора, скорость вылета  $V=1 \times 10^4 \text{ м/с}$ ; 2 -  $U=300\text{В}$ ,  $j=5 \text{ А/м}^2$ ,  $p=1,5$  тора,  $V=1 \times 10^4 \text{ м/с}$ ; 3 -  $U=300\text{В}$ ,  $j=5 \text{ А/м}^2$ ,  $p=0,5$  тора,

$V=1,9 \times 10^4$  м/с; 4 -  $U=300$ В,  $j=5$  А/м<sup>2</sup>,  $p=1,5$  тора,  $V=1,9 \times 10^4$  м/с; 5 -  $U=500$ В,  $j=5$  А/м<sup>2</sup>,  $p=0,5$  тора,  $V=1 \times 10^4$  м/с; 6 -  $U=500$ В,  $j=5$  А/м<sup>2</sup>,  $p=1,5$  тора,  $V=1 \times 10^4$  м/с; 7 -  $U=300$ В,  $j=15$  А/м<sup>2</sup>,  $p=0,5$  тора,  $V=1,9 \times 10^4$  м/с; 8 -  $U=300$ В,  $j=15$  А/м<sup>2</sup>,  $p=1,5$  тора,  $V=1,9 \times 10^4$  м/с.

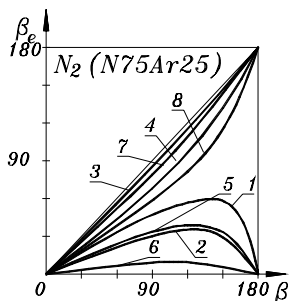


Рис. 1.36. Зависимости углов входа в столкновение от углов выхода для  $N_2$  в среде  $N75Ar25$ , рассчитанные по критерию ограничения периодом между столкновениями

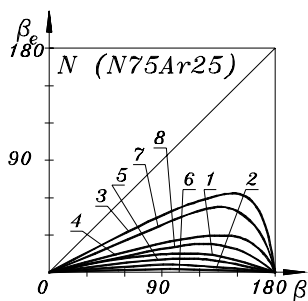


Рис. 1.37. Зависимости углов входа в столкновение от углов выхода для  $N$  в среде  $N75Ar25$ , рассчитанные по критерию ограничения периодом между столкновениями

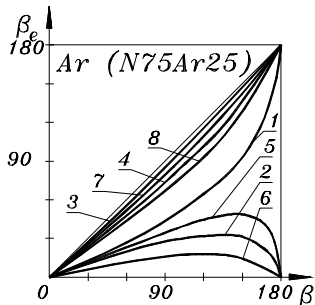


Рис. 1.38. Зависимости углов входа в столкновение от углов выхода для  $Ar$  в среде  $N75Ar25$ , рассчитанные по критерию ограничения периодом между столкновениями

Общие тенденции зависимостей на рис. 1.36...1.38 сводятся к следующему. Все кривые находятся между горизонтальной осью абсцисс и прямой, проведенной под углом  $45^\circ$  к ней, т.е. при бесконечном увеличении скорости вылета  $V$  или при нулевом потенциале  $U$  углы входа у столкновение  $\beta_e$  практически не будут отличаться от углов вылета из предыдущего столкновения  $\beta$ , а при бесконечном потенциале или при нулевой скорости все углы входа у столкновение  $\beta_e$

будут равны нулю. Из графиков следует, что рост плотности тока приближает зависимости к оси абсцисс, аналогично влияет увеличения межэлектродного потенциала. Наоборот, рост давления,

скорости и массы частицы приближает график к биссектрисе прямого угла. К определенной границе, которая приблизительно соответствует начальной производной графика зависимости, равной тангенсу угла  $22,5^\circ$ , все кривые заканчиваются нулевым значением угла входа в столкновение, а для зависимостей, начинающихся более круто, конечная точка соответствует значению угла входа в столкновение  $180^\circ$  относительно вектора поля. На практике это означает, что при угле вылета  $180^\circ$  в зависимости от условий технологического режима и типа среды возможны две ситуации: частица в пределах времени соответственно периоду между столкновениями не успевает превратить всю свою кинетическую энергию в потенциальную или в некоторое допустимое в пределах периода между столкновениями время постепенно замедляет свое движение вплоть до полной остановки, а потом начинает движение уже в направлении вектора поля.

Температура, как пятый определяющий для движения частицы в поле фактор, влияет на смену угла входа у столкновение очень незначительно (в пределах  $300^\circ \dots 500^\circ\text{C}$  колебание угла  $\beta_e$  укладывается в  $4^\circ$ ). Это объясняется, во-первых, тем, что в расчетах по формуле (12) фигурирует термодинамическая температура в градусах Кельвина, а это уменьшает диапазон относительных колебаний ее, во-вторых изменение температуры адекватно, но с противоположной тенденцией, изменяет ширину ОКП, которая соответственно приводит к коррекции параметров поля и нивелирует изменение угла входа у столкновение. По этой причине в дальнейшей аналитической модели с целью ее упрощения температура как фактор влияния отсутствует.

Сопоставление рис. 1.36...1.38 указывает также и на то, что чем меньшая масса частицы при других неизменных параметрах режима, тем угол входа в столкновение, в том числе, поскольку речь идет о первом ПСП, и с поверхностью приближается к нулю, а относительно поверхности – к нормали. Это замечание должно иметь существенное влияние на характер процессов взаимодействия газа с поверхностью (передача энергии, вход в поверхность, ее распыление и т.п.). Компоненты малой массы и размеров (последнее влияет на приведенное сечение столкновений

$\sigma_{vei} = \sum_1^z \pi (r_i + r_z)^2 K_{p wz}$ , а через него – на период между столкновениями), таким образом, бомбардируют поверхность практически под прямым углом.

Зависимости на рис. 1.36...1.38 лучше всего описываются уравнением вида



$$\beta_e = a\beta + (a - 0.4142) \cdot b \cdot \beta^c, \quad (13)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  - коэффициенты, определяемые в зависимости от

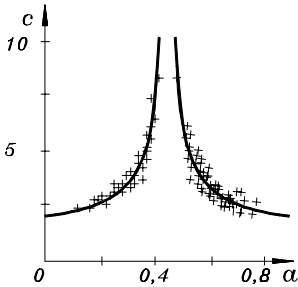


Рис. 1.39. Зависимость между коэффициентами  $a$  и  $c$

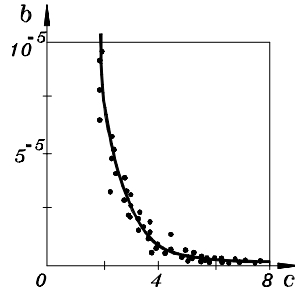


Рис. 1.40. Зависимость между коэффициентами  $b$  и  $c$

вышеперечисленных факторов влияния.

С целью упрощения модели были проанализированы соотношения коэффициентов между собой, установлено наличие корреляционных зависимостей между ними. Так коэффициент  $c$  связан с коэффициентом  $a$  зависимостью, которая показана на рис. 1.39, а коэффициент  $b$  с  $c$  - соответственно – рис. 1.40. Общая структура модели угла входа в столкновение формировалась по методике [5].

Для всех видов частиц коэффициент  $a$  определяется

$$a(p, j, V, U) = 1 + KV1(p, j, V) \cdot U + KV2(p, j, V) \cdot U^2, \quad (14)$$

где  $Ksn$  – коэффициенты влияния фактора  $s$  (обозначение факторов влияния отвечает расшифровке обозначений к рис. 1.36...1.38, приведенным выше) с порядковым номером  $n$ .

Для молекулярного азота  $N_2$  в среде N75Ar25

$$KV1(p, j, V) = Kj1(p, j) + Kj2(p, j) \cdot V, \quad (15)$$

$$KV2(p, j, V) = -0,001269 \cdot KV1(p, j, V) - 0,0000008504$$

$$Kj1(p, j) = Kp1(p) + Kp2(p) \cdot j + Kp3(p) \cdot j^2, \quad (16)$$

$$Kj2(p, j) = -0,001493 - 1,164 \cdot Kj1(p, j) - 95,19 \cdot (Kj(p, j))^2$$

$$Kp1(p) = -0,008564 + 0,01205 \cdot p - 0,00707 \cdot p^2 \quad (17)$$

$$Kp2(p) = 0,0003396 - 0,001223 \cdot p - 0,000728 \cdot p^2$$

$$Kp3(p) = 0,00005088 - 0,00001524 \cdot p - 0,00002968 \cdot p^2$$

Другие коэффициенты для уравнения (13)

$$c = 10,49 \cdot \left( \sqrt{(a - 0,4142)^2} \right)^{-0,2013} - 10,24, \quad (18)$$

или в упрощенном варианте

$$c = 10,5 \cdot \left( (a - 0,4142)^2 \right)^{-0,1} - 10, \quad (19)$$

$$b = 4,672 \cdot 10^{-4} \cdot (c - 1,5)^{-6,844}, \quad (20)$$

или аналогично в упрощенном виде

$$b = 6,3 \cdot 10^{-6} \cdot (c - 2,4)^{-3} \quad (21)$$

Для атомарного азота N в среде N75Ar25

$$KV1(p, j, V) = Kj1(p, j) + Kj2(p, j) \cdot V, \quad (22)$$

$$KV2(p, j, V) = -0,001555 \cdot KV1(p, j, V) - 0,000001788$$

$$Kj1(p, j) = Kp1(p) + Kp2(p) \cdot j + Kp3(p) \cdot j^2, \quad (23)$$

$$Kj2(p, j) = Kp4(p) + Kp5(p) \cdot j + Kp6(p) \cdot j^2$$

$$Kp1(p) = -0,006468 + 0,000768 \cdot p - 0,000344 \cdot p^2$$

$$Kp2(p) = -0,0000851 + 0,0001181 \cdot p - 0,0000698 \cdot p^2, \quad (24)$$

$$Kp3(p) = 0,00000334 - 0,00000534 \cdot p + 0,00000316 \cdot p^2$$

$$Kp4(p) = 0,000748 + 0,003548 \cdot p - 0,002356 \cdot p^2$$

$$Kp5(p) = 0,0000506 - 0,0002605 \cdot p + 0,000195 \cdot p^2$$

$$Kp6(p) = -0,00000224 + 0,00000958 \cdot p - 0,00000692 \cdot p^2$$

$$c = 10,98 \cdot \left( \sqrt{(a - 0,4142)^2} \right)^{-0,2164} - 10,3, \quad (25)$$

или в упрощенном варианте

$$c = 11 \cdot \left( (a - 0,4142)^2 \right)^{-0,1} - 10, \quad (26)$$

$$b = 0,6455 \cdot (c - 0,1)^{-11,15}, \quad (27)$$

или в упрощенном виде

$$b = 1 \cdot 10^{-6} \cdot (c - 2,35)^{-2,5} \quad (28)$$

Для атомарного аргона Ar в среде N75Ar25

$$KV1(p, j, V) = Kj1(p, j) + Kj2(p, j) \cdot V, \quad (29)$$

$$KV2(p, j, V) = -0,001183 \cdot KV1(p, j, V) - 0,0000006805$$

$$Kj1(p, j) = Kp1(p) + Kp2(p) \cdot j + Kp3(p) \cdot j^2, \quad (30)$$

$$Kj2(p, j) = 0,0004661 - 0,2995 \cdot Kj1(p, j)$$

$$Kp1(p) = -0,006494 + 0,00914 \cdot p - 0,005832 \cdot p^2 \quad (31)$$

$$Kp2(p) = -0,0000011 - 0,0004359 \cdot p + 0,0003502 \cdot p^2,$$

$$Kp3(p) = -0,0000005 + 0,00001462 \cdot p - 0,00001148 \cdot p^2$$

$$c = 10,4 \cdot \left( \sqrt{(a - 0,4142)^2} \right)^{-0,2099} - 10,38, \quad (32)$$

или в упрощенном варианте аналогично формуле (19)

$$b = 3,597 \cdot c^{-10,37} \quad (33)$$

Для молекулярного водорода H<sub>2</sub> в среде N75Ar25

$$KV1(p, j, V) = Kj1(p, j) + Kj2(p, j) \cdot V, \quad (34)$$

$$KV2(p, j, V) = -0,001826 \cdot KV1(p, j, V) - 0,000003034$$

$$Kj1(p, j) = Kp1(p) + Kp2(p) \cdot j, \quad (35)$$

$$Kj2(p, j) = -0,00502 - 0,9713 \cdot Kj1(p, j)$$

$$Kp1(p) = -0,004851 - 0,002485 \cdot p + 0,001538 \cdot p^2, \quad (36)$$

$$Kp2(p) = 0,0000262 + 0,0000013 \cdot p - 0,0000158 \cdot p^2$$

$$c = 11,34 \cdot \left( \sqrt{(a - 0,4142)^2} \right)^{-1,625} - 10,67, \quad (37)$$

или в упрощенном варианте

$$c = 10,4 \cdot ((a - 0,4142)^2)^{-0,1} - 10,4, \quad (38)$$

$$b = 3,9 \cdot 10^{-7} \cdot (c - 2,4)^{-2} \quad (39)$$

Следует заметить, что для молекулярного водорода реальные значения угла входа в столкновение не превышают  $6^\circ$  при  $U=300$  В,  $4^\circ$  -  $U=400$  В,  $2,5^\circ$  -  $U=500$  В. Для атомарного водорода эти показатели еще меньшие и составляют соответственно  $0,03^\circ$ ;  $0,0015^\circ$ ;  $0,000043^\circ$ , по этой причине модель для атомарного водорода вообще не формировалась. Таким образом, допустимо считать, что частицы водорода входят в следующее столкновение практически без отклонений от вектора поля. Поэтому в аналогичной ситуации, но относительно электронов, бомбардирующих анод, можно утверждать, что их столкновение с поверхностью проходит по нормали к ней.

Относительно соотношений характера взаимодействия с поверхностью ионов азота и аргона из приведенных выше графиков следует, что аргон, для которого вероятность значительных углов входа в поверхность большая, имеет и большую способность к распылению поверхности. Если концентрация аргона в смеси повышается, то одновременно уменьшается азотный потенциал, т.е. становится меньшей производительность процесса образования нитридов, а это в результате обеспечивает менее жесткий режим азотирования, что особенно важно для азотоактивных материалов.

Состав газовой среды, в котором двигается частица, несколько изменяет зависимости угла входа в столкновение от угла вылета.

Таблица 1.9.

**Приведенные сечения столкновений  $\sigma_{vc}$  и их отношение ( $\times 10^{19} \text{ м}^2$ )**

Смесь	Ион компонента				
	N	N <sub>2</sub>	Ar	H	H <sub>2</sub>
N10Ar90	2,398	4,302	4,175	1,98	3,208
N75Ar25	2,461	4,386	4,258	2,037	3,88
Отношение	0,974	0,98	0,981	0,972	0,978

Решающее значение при этом, как было установлено, имеет приведенное сечение столкновений частиц с компонентами газа, значения которых для типичных случаев приведены в табл. 1.9 и рассчитаны по формуле

$$\sigma_{vci} = \sum_1^z \pi (r_i + r_z)^2 K_{pvc} \quad (40)$$

Сопоставление коэффициентов  $a$  уравнение (13) для одинаковых частиц, двигающихся в разных по составу газовых средах, указывает на наличие корреляционной зависимости между их отношением и обратным отношением приведенных сечений столкновений

$$a_{N75Ar25} / a_W = \sigma_{vcW} / \sigma_{vcN75Ar25}, \quad (41)$$

где  $a_{N75Ar25}$  и  $a_W$  – значение коэффициентов для некоторой частицы, которая движется в среде N75Ar25 и в произвольной среде,

$\sigma_{vcN75Ar25}$  и  $\sigma_{vc}$  – аналогично – приведенные сечения столкновений.

Другие коэффициенты могут определяться по приведенным выше формулам связи между коэффициентами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  для конкретных частиц.

Представление о потенциальных энергетических возможностях иона может дать величина энергии, которую он получит от поля в результате бесстолкновительного пролета некоторого ПСП. При этом будем исходить из того, что при среднем значении косинуса угла рассеяния иона после столкновения с тепловой частицей  $2/3$  [6, с. 30], приблизительном равенств масс участников столкновения ион

теряет часть своей энергии  $k_c = \frac{2m_+}{m_W} (1 - \overline{\cos\theta})$ , которая

приближается к единице, т.е. после каждого из столкновений ион начинает набирать энергию практически из нулевого значения. Таким образом, формирует его энергетический уровень в основном энергия, которую он получит после последнего перед катодом столкновения. Некоторое представление о порядке величин этой энергии дает табл. 1.10, в которой для основных типов ионов приведены данные о величине энергии, полученной ионом после бесстолкновительного пролета первого  $\varepsilon_1$  и второго  $\varepsilon_2$  от катода ПСП, а также соответствующих для этих энергий скоростей иона (газовая среда - N75Ar25). Поскольку модель формирования энергетики падающего потока базируется на усредненных параметрах, среди которых определяющим есть СДСП частицы, то бесстолкновительное движение частицы к катоду от анодной границы первого ПСП возможно только при угле вылета  $\beta=0$ . При всех других отличных от нуля значениях угла вылета бесстолкновительное движение возможно только при старте из точки ОКП, которая ближе к катоду, чем СДСП.

**Типичные энергетические характеристики ионов после  
бесстолкновительного пролета первого и второго ПСП**

Тип иона	$p, j$ (тор, A/m <sup>2</sup> )	$U$ (В)	$\varepsilon_1$ (эВ)	$\varepsilon_2$ (эВ)	$V_1 \times 10^{-4}$ (м/с)	$V_2 \times 10^{-4}$ (м/с)
N	P=0,5 J=5	300	70	60	3,102	2,872
		400	92	81	3,557	3,337
		500	116	101	3,994	3,726
	P=1,5 J=15	300	101	81	3,736	3,337
		400	135	107	4,308	3,836
		500	169	134	4,82	4,292
N <sub>2</sub>	P=0,5 J=5	300	40	37	1,658	1,595
		400	54	50	1,927	1,854
		500	67	62	2,146	2,065
	P=1,5 J=15	300	59	53	2,014	1,909
		400	79	70	2,33	2,194
		500	99	88	2,609	2,46
Ar	P=0,5 J=5	300	41	38	1,405	1,353
		400	55	51	1,628	1,568
		500	69	64	1,823	1,756
	P=1,5 J=15	300	61	54	1,714	1,613
		400	81	72	1,976	1,813
		500	102	90	2,217	2,082

В таком случае возможный уровень энергии частицы будет меньше энергии бесстолкновительного пролета первого ПСП. Введем понятие коэффициента энергоемкости как отношение реально достигнутой энергии при старте частицы из произвольной точки первого ПСП к энергии бесстолкновительного прохождения его

$$K_{\varepsilon} = \frac{\varphi_y}{\varphi_l} = \frac{2\delta y - y^2}{2\delta l - (\bar{l})^2} \leq 1, \quad (42)$$

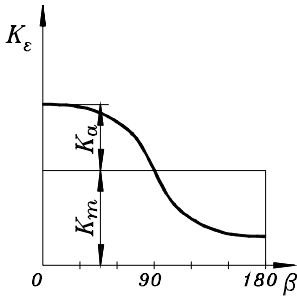
где  $\varphi_y, \varphi_l$  – потенциалы поля ОКП в точках старта частицы с координатой  $y$  и границы первого ПСП. Ограничение значением единицы в формуле (42) объясняется тем, что реально частица дальше поверхности двигаться не может, хотя теоретическая траектория, определенная из условия ограничения времени периодом между столкновениями, может превышать СДСП.

Типичный вид зависимости коэффициента энергоемкости от угла вылета показан на рис. 1.41, причем эти зависимости для большинства реальных режимов описываются косинусоидой

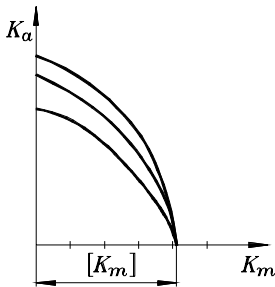
$$K_\varepsilon = K_m + K_a \cos \beta, \quad (43)$$

где  $K_m, K_a$  – постоянная и переменная составляющие.

Тенденции изменения составляющих заключаются в следующем. При росте напряжения и неизменной ширине ОКП



*Рис. 1.41. Типовая зависимость для расчета коэффициента энергоемкости*



*Рис. 1.40. Типовая зависимость между постоянной и переменной составляющими*

постоянная составляющая увеличивается, а переменная уменьшается.

Увеличение скорости вылета дает противоположные следствия, зависимость приближается к отнулевой косинусоиде. В пределах одного давления переменная составляющая варьирует в незначительных границах, поэтому для упрощения модели можно определять ее только в зависимости от давления.

Однако более точно характер изменения коэффициента энергоемкости отображается, если принять во внимание, что между переменной и постоянной составляющими существует взаимосвязь, показанная рис. 1.40, где графики зависимостей между ними имеют вид семейства кривых, сходящихся в одной точке – критическом значении постоянной составляющей.

Общий вид зависимости

$$K_a = a_m + b_m K_m^{c_m}, \quad (44)$$

где  $a_m, b_m, c_m$  – коэффициенты пропорциональности, определяемые

$$\begin{aligned} a_m &= a_{U0} + k_{au} \cdot U \\ b_m &= b_{U0} + k_{bu} \cdot U \\ c_m &= c_{U0} + k_{cu} \cdot U \end{aligned} \quad (45)$$

Коэффициенты в формулах (45) определяются, как отмечалось выше, в зависимости от давления, типа частицы и газовой среды.

Для молекулярного азота  $N_2$  показателя относительно переменной составляющей определяются

$$a_{U0}(p) = 1,089 - 0,199p + 0,1353p^2 \quad (46)$$

$$b_{U0}(p) = -0,01217 + 0,0306p - 0,02016p^2$$

$$c_{U0}(p) = 3,27 - 2,011p + 1,06p^2$$

$$k_{au}(p) = 0,000003 + 0,000167p - 0,000146p^2 \quad (47)$$

$$k_{bu}(p) = 0,000005085 - 0,00002976p + 0,00002317p^2$$

$$k_{cu}(p) = 0,00038 - 0,00275p + 0,00214p^2$$

Постоянная составляющая коэффициента энергоёмкости рассчитывается

$$K_m(p, j, V, U) = Kmv(p, j, V) \cdot U, \quad (48)$$

$$Kmv(p, j, V) = Kmjl(p, j) \cdot (V + 1)^{-Kmj2(p, j)}, \quad (49)$$

$$Kmj2(p, j) = Kp1(p) + Kp2(p) \cdot j + Kp3(p) \cdot j^2; Kmjl(p, j) = 0,037, \quad (50)$$

$$Kp1(p) = 2,489 + 5,254p - 3,336p^2, \quad (51)$$

$$Kp2(p) = 0,006 - 0,2628p + 0,206p^2, \quad (52)$$

$$Kp3(p) = -0,00052 + 0,00888p - 0,0068p^2 \quad (53)$$

Для атомарного аргона Ag коэффициенты относительно переменной составляющей определяются

$$a_{U0}(p) = 1,092 - 0,2078p + 0,14p^2 \quad (54)$$

$$b_{U0}(p) = -0,01169 + 0,03012p - 0,02016p^2$$

$$c_{U0}(p) = 3,31 - 2,061p + 1,071p^2$$

$$k_{au}(p) = 0,0000015 + 0,000177p - 0,000152p^2 \quad (55)$$

$$k_{bu}(p) = 0,000004 - 0,0000285p + 0,000023p^2$$

$$k_{cu}(p) = 0,00029 - 0,00264p + 0,00212p^2$$

Постоянная составляющая коэффициента энергоёмкости рассчитывается дополнительно к формулам (48...50)

$$Kp1(p) = 2,955 + 5,239p - 3,33p^2, \quad (56)$$

$$Kp2(p) = 0,0045 - 0,2603p + 0,205p^2, \quad (57)$$

$$Kp3(p) = -0,00046 + 0,00878p - 0,00676p^2 \quad (58)$$

Для атомарного азота модель коэффициента энергоёмкости имеет несколько другую структуру, поскольку характер влияния межэлектродного потенциала такой, что от него зависит только один из коэффициентов формулы (44). Поэтому

$$a_m = 1,18 - 0,28p + 0,16p^2, \quad (59)$$

$$b_m = -0,023 + 0,046p - 0,028p^2, \quad (60)$$

$$c_m = c1(p) + c2(p)U + c3(p)U^2, \quad (61)$$

$$c1(p) = 4,6 - 17,4p + 14p^2 \quad (62)$$

$$c2(p) = 0,00585 + 0,0502p - 10,0478p^2$$

$$c3(p) = -0,0000095 - 0,000044p + 0,000046p^2$$

Для расчета постоянной составляющей дополнительно к формулам (48), (49)

$$Kmj1(p, j) = Kp1(p) + Kp2(p) \cdot j + Kp3(p) \cdot j^2, \quad (63)$$

$$Kmj2(p, j) = Kp4(p) + Kp5(p) \cdot j + Kp6(p) \cdot j^2, \quad (64)$$

$$Kp1(p) = 0,003599 + 0,003865p - 0,00101p^2$$

$$Kp2(p) = 0,001932 - 0,00293p + 0,001277p^2 \quad (65)$$

$$Kp3(p) = -0,00007204 + 0,0001094p - 0,00004716p^2$$

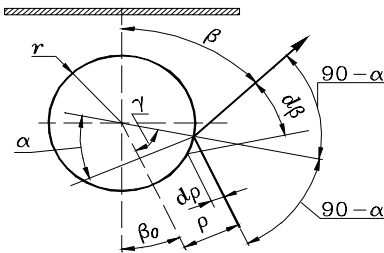
$$Kp4(p) = -1,461 + 9,232p - 5,488p^2$$

$$Kp5(p) = 0,2531 - 0,5078p + 0,2332p^2$$

$$Kp6(p) = -0,01546 + 0,03444p - 0,01864p^2$$

Для легких частиц, например - водорода, коэффициент энергоемкости в пределах реальных технологических параметров модификации равняется единице.

Координата старта частицы на последнем этапе движения к катоду в значительной степени зависит от угла вылета из столкновения с учетом искривления траектории движения под действием электрического поля и ограничение ее протяжности значением СДСП.



*Рис. 1.41. Схема для расчета вероятности угла отражения*

Схема для расчета вероятностных показателей угла вылета из последней столкновения показана на рис. 1.41. Частица входит у столкновение с компонентом газовой среды, радиус которого  $r$ ,

под некоторым начальным углом  $\beta_0$  к направлению вектора поля. В принципе все углы вылета из предыдущего столкновения равновероятны, поэтому наиболее корректно в качестве начального угла выбрать значение среднего угла вылета, определенного по критерию ограничения длины траектории, поскольку именно в этом случае будет учтено взаимодействие частицы с полем.

С рис. 1.41 следует, что

$$\beta = 180 - 2 \cdot (90 - \alpha) - \beta_0 = 2\alpha - \beta_0, \quad (66)$$



$$\alpha = \arccos(\rho/r), \quad (67)$$

$$d\beta = 2d\alpha = 2 \cdot \left( \arccos\left(\frac{\rho - d\rho}{r}\right) - \arccos\left(\frac{\rho}{r}\right) \right) \quad (68)$$

При единичном радиусе  $r=1$   $\alpha = \arccos(\rho)$ . Тогда

$$\frac{d\alpha}{d\rho} = -\frac{1}{\sqrt{1-\rho^2}}, \quad \text{а} \quad \frac{d\beta}{d\rho} = 2 \cdot \frac{d\alpha}{d\rho} = -\frac{2}{\sqrt{1-\rho^2}} \quad (69)$$

Распределение вероятностей прицельного параметра  $\rho$ , который может изменяться в пределах  $2\rho$ ,

$$w_\rho(\rho) = \frac{1}{2\rho} \quad (70)$$

Согласно рис. 1.41  $\beta = \pi - \beta_0 - 2\gamma$ ,  $\gamma = \arcsin(\rho)$ , поэтому  $\beta = \pi - \beta_0 - 2\arcsin(\rho)$ , а  $0 \leq \beta \leq 2\pi$ . Учитывая, что связь между событиями А (нахождение прицельного параметра в диапазоне значений  $\rho^* \leq \rho \leq \rho^* - d\rho$ ) и В (нахождение угла вылета в диапазоне  $\beta^* \leq \beta \leq \beta^* + d\beta$ ) однозначна, вероятность событий одинакова

$$P(A) = w_\rho(\rho) \cdot d\rho = P(B) = w_\beta(\beta) \cdot d\beta \quad (71)$$

Тогда с учетом формулы (70) распределение вероятностей угла вылета

$$w_\beta(\beta) = w_\rho(\rho) \cdot \left| \frac{d\rho}{d\beta} \right| = \frac{1}{2r} \cdot \left| \frac{d\rho}{d\beta} \right| \quad (72)$$

$$\text{Поскольку } \rho = \sin\left(\frac{\pi - \beta - \beta_0}{2}\right), \text{ то } \frac{d\rho}{d\beta} = -\frac{1}{4} \cos\left(\frac{\pi - \beta - \beta_0}{2}\right),$$

и, таким образом, распределение вероятностей угла вылета

$$w_\beta(\beta) = \frac{1}{4r} \left| \cos\left(\frac{\pi - \beta - \beta_0}{2}\right) \right| = \frac{1}{4r} \left| \cos\left(\frac{\pi - \beta + \beta_0}{2}\right) \right| = \frac{1}{4r} \left| \sin\left(\frac{\beta + \beta_0}{2}\right) \right|. \quad (73)$$

Начальный угол как среднее значение углов входа в столкновение после вылета из предыдущего столкновения в диапазоне углов  $0..180^\circ$  рассчитан в варианте с ограничением траектории СДСП. Типичные зависимости начального угла от параметра  $v = V \cdot 10^{-4}$  м/с для атомарного азота и молекулярного водорода в газовой среде N75Ar25 показанные на рис. 1.44 и 1.45 соответственно, при этом характеристики технологического режима представляют для графиков 1 – U=300 В, j=5 А/м<sup>2</sup>, p=0,5 тора; 2 – U=300 В, j=15 А/м<sup>2</sup>, p=1,5 тора; 3 – U=500 В, j=5 А/м<sup>2</sup>, p=0,5 тора; 4 – U=500 В, j=15 А/м<sup>2</sup>, p=1,5 тора.

Лучше всего кривые, показанные на рис. 1.44, моделируются формулой вида

$$\bar{\beta}(p, j, U, \nu) = 90(1 - a_{\beta}(p, j, U)^{-\nu}) - b_{\beta}(p, j, U)\nu e^{-0,1\nu^{c_{\beta}}}, \quad (74)$$

где  $a_{\beta}$ ,  $b_{\beta}$ ,  $c_{\beta}$  - коэффициенты, которые определяются

$$a_{\beta}(p, j, U) = aj1(p, j)U + aj2(p, j)U^2, \quad (75)$$

$$b_{\beta}(p, j, U) = b_0 + k_{ba} \cdot a_{\beta}(p, j, U), \quad (76)$$

$$c_{\beta}(p, j, U) = c_0 + k_{ca} \cdot a_{\beta}(p, j, U), \quad (77)$$

$$b_0 = -34,54; \quad k_{ba} = 28,605; \quad c_0 = 4,51; \quad k_{ca} = -0,825.$$

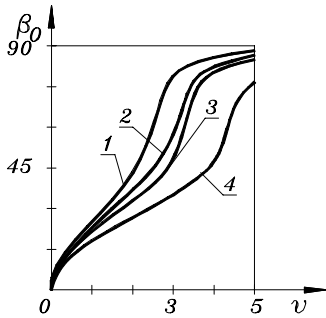


Рис. 1.44. Зависимость начального угла от скорости для атомарного азота

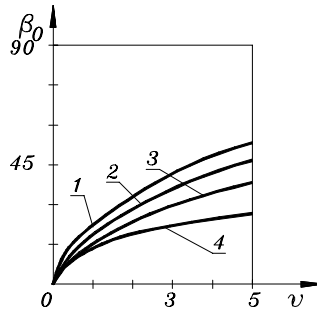


Рис. 1.45. Зависимость начального угла от скорости для  $H_2$

Составляющие коэффициента  $a_{\beta}$  для атомарного азота в среде N75Ar25 рассчитываются

$$aj1(p, j) = Kp1(p) + Kp2(p)j + Kp3(p)j^2, \quad (78)$$

$$aj2(p, j) = 0,000008341 - 0,001776aj1(p, j), \quad (79)$$

$$Kp1(p) = 0,01566 - 0,02575p + 0,01891p^2, \quad (80)$$

$$Kp2(p) = 0,0000175 + 0,002853p - 0,002676p^2,$$

$$Kp3(p) = -0,00000054 - 0,0001264p + 0,0001213p^2$$

Для молекулярного азота

$$aj2(p, j) = 0,000002789 - 0,001618aj1(p, j), \quad (81)$$

$$Kp1(p) = 0,02759 + 0,01865p - 0,02182p^2, \quad (82)$$

$$Kp2(p) = -0,00267 + 0,000082p + 0,00208p^2,$$

$$Kp3(p) = 0,0000772 + 0,0000568p - 0,0001144p^2$$

$$b_0 = 17,6436; \quad k_{ba} = 4,6321; \quad c_0 = -0,9821; \quad k_{ca} = 1,798.$$

Для атомарного аргона

$$aj2(p, j) = -0,0000009715 - 0,001384aj1(p, j), \quad (83)$$

$$\begin{aligned} Kp1(p) &= 0,01586 + 0,02676p - 0,0216p^2 \\ Kp2(p) &= -0,000112 - 0,000417p + 0,001386p^2 \\ Kp3(p) &= 0,00003367 - 0,0000906p \end{aligned} \quad (84)$$

$$b_0 = 19,9178; \quad k_{ba} = 4,0459; \quad c_0 = -0,7892; \quad k_{ca} = 1,7491.$$

Зависимости для водорода (рис. 1.45) моделируются проще в сравнении с формулой (74)

$$\bar{\beta}(p, j, U, v) = a_{\beta}(p, j, U) \cdot v^{b_{\beta}(p, j, U)} \quad (85)$$

Для атомарного водорода дополнительно к формуле (78)

$$a_{\beta}(p, j, U) = aj1(p, j) + aj2(p, j)U, \quad (86)$$

$$b_{\beta}(p, j, U) = 0,4421 + 0,0143 \cdot a_{\beta}(p, j, U), \quad (87)$$

$$aj2(p, j) = 0,001758 - 0,0006814aj1(p, j), \quad (88)$$

$$Kp1(p) = 9,97 + 8,27p - 5,7p^2 \quad (89)$$

$$Kp2(p) = -0,237 - 0,032p + 0,192p^2$$

$$Kp3(p) = 0,0082 - 0,0004p - 0,0056p^2$$

отличия для молекулярного водорода сравнительно с атомарным заключаются только в следующем

$$Kp1(p) = 13,32 + 10,74p - 7,28p^2 \quad (90)$$

$$Kp2(p) = -0,26 - 0,064p + 0,24p^2$$

$$Kp3(p) = 0,012 - 0,0006p - 0,004p^2$$

Для определения среднего угла входа в столкновение частицы, которая движется в среде, отличной от N75Ar25 целесообразно использовать формулу, аналогичную (41)

$$\bar{\beta}_{N75Ar25} / \bar{\beta}_W = \sigma_{vcW} / \sigma_{vcN75Ar25} \quad (91)$$

Изложенная выше аналитическая модель влияния кинетики прикатодных процессов на формирование энергетических характеристик применяется в аналитическом аппарате программ для расчета энергетического спектру частиц, которые бомбардируют поверхность при ее модификации, поскольку данные об энергии падающего потока имеют приоритетное значение для прогнозирования преобразований на границе газ-поверхность.

#### 1.4.2. Кинетика формирования падающего потока

Решающую роль во взаимодействии газовой среды с металлической поверхностью в процессах ее обработки, использующих для интенсификации тлеющий разряд, играет ЭСПП. Известные работы по теории и практике ВДГРТ отводят энергии частиц, бомбардирующих поверхность, безусловно первичное значение, которое в первую очередь определяет интенсивность

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*

кинетики всех элементарных явлений на границе газ - металл и в приповерхневых слоях металла [7-10]. Действительно температура как показатель меры энергетичности фигурирует во всех уравнениях для определения коэффициентов диффузии, тем не менее, учитывая, что температура поверхности, хотя и является важным параметром, не может, например, в достаточной мере обосновано объяснить большинство явлений, связанных с распылением поверхности, образованием отдельных видов фаз, т.е. не всегда тонко отображает механизм собственно модификации поверхности. Поскольку для модификационных процессов имеет значение не только температура поверхности, устанавливающаяся в основном как следствие ее бомбардировки заряженным и нейтральным частицами, но и распределение энергии составляющих падающего потока, то более перспективно рассматривать модель, в которую входят элементарные подпроцессы, имеющие место относительно всех главных компонентов газовой среды. Подобный подход обеспечит более точное освещение механизма соотношений ЭСПП с энергетическими уровнями преобразования и взаимодействия компонентов сред, т.е. разработку модели, пригодной для управления конечными результатами обработки.

Независимо от того, как выглядит траектория движения конкретной частицы в ОКП, все частицы, которые падают на поверхность и имеют энергию существенно отличную от энергии теплового движения, можно разделить на заряженные (ионы) и нейтральные (быстрые нейтрале) и дальше каждый из этих видов на такие, которые достигают катода в результате бесстолкновительного движения и со столкновениями. Как бы не складывалась предыдущая судьба частицы, которая движется со столкновениями, последнее столкновение может иметь место только в зоне ОКП, которая непосредственно прилегает к катоду и ширина которой равняется СДСП  $\bar{l}$  - ПСП, т.е. прослойкой газовой среды, которую усредненная частица определенного сорта может гарантировано пройти без столкновений. Введение понятия ПСП с шириной, равной СДСП определенного компонента в газовой среде конкретного состава при некоторых параметрах технологического режима, разрешает использовать сходство всех областей катодного падения, поскольку как ширина ОКП, так и ширина ПСП зависят от одних и тех же характеристик процесса, причем их влияние – однотипно. По этой причине, применяя вместо абсолютной координаты  $y$  точки поля, в которой состоялась последнее столкновение, относительную безразмерную

$$K_y = y/\bar{l}, \quad (1)$$

во многих случаях получим зависимости, на которые текущие характеристики технологического режима практически не влияют, что значительно упростит их дальнейшую обработку. В подобных случаях более или менее заметную роль будут играть только факторы, которые непосредственно не связаны с этими характеристиками.

Схема движения частицы к катоду после столкновения в пределах ПСП показана на рис. 1.46. Как отмечалось выше, частица может достичь катода после столкновения с любой точки ПСП, тем

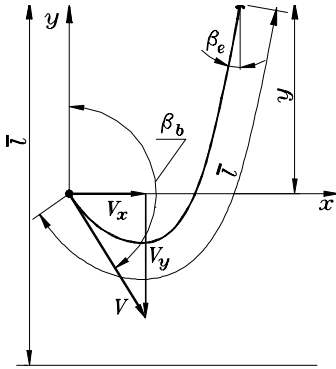


Рис. 1.46. Схема для расчета граничных углов вылета и входа в поверхность

не менее вероятность этого события зависит от угла вылета и кинематики движения. Действительно в зависимости от скорости вылета имеет место такое предельное значение угла вылета, при превышении которого частица не сможет без новых столкновений достичь катода, поскольку условие бесстолкновительного движения частицы состоит в ограничении протяжности траектории ее движения СДСП. По этой причине вероятностные характеристики столкновений в пределах ПСП должны определяться с учетом

распределения вероятности угла вылета в системе углов относительно направления входа в столкновение

$$w_{\beta}(\beta) = \frac{1}{4} \left| \sin \left( \frac{\beta + \beta_0}{2} \right) \right|, \quad (2)$$

где  $\beta$  – текущий угол движения частицы относительно вектора поля ( $-\beta_0 \leq \beta \leq 2\pi - \beta_0$ ),

$\beta_0$  – средний угол входа в столкновение.

Вторым ограничением в использовании уравнения (2) есть предельное значение угла вылета  $\beta_b$ . Означенному предельному углу вылета соответствует предельный угол входа в поверхность после столкновения  $\beta_e$ . Движение частицы в электрическом поле подчиняется параметрическим уравнением

$$x = Vt \sin \beta, \quad (3)$$

$$y = Vt \cos \beta + \frac{q_e E(y)}{2m_+} t^2 \quad (4)$$

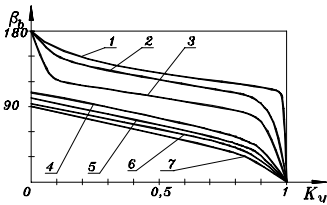
где  $q_e$  – элементарный заряд, который номинально равняется заряду электрона,

$E(y)$  – закон изменения напряженности поля в направлении нормали к катоду,

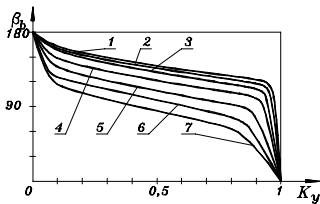
$t$  – текущее время движения,

$m_+$  - масса иона.

Интервал времени выбирается из такого расчета, чтобы траектория движения частицы раскладывалась не меньше, чем на 50 участков и составлял по порядку величин  $10^{-10}$  с (на практике количество элементов траектории в большинстве случаев составляла нескольких сотен и достигало значений 700, что при длине траектории порядка 0,1 мм обеспечивало очень высокую точность



*Рис. 1.47. Зависимость граничного угла вылета от относительной координаты ОКП и скорости вылета для молекулярного азота*



*Рис. 1.48. Зависимость граничного угла вылета от относительной координаты ОКП и скорости вылета для атомарного водорода*

определения как траектории движения, так и углов).

Типичные графики зависимости предельного угла вылета  $\beta_b$  от относительной безразмерной координаты ПСП  $K_y$  для молекулярного азота показаны на рис. 1.47, для атомарного водорода – на рис. 1.48.

Аналогично взаимосвязь относительной координаты и скорости вылета с предельным углом входа в поверхность  $\beta_e$  для атомарного азота отображена на рис. 1.49, а для молекулярного водорода - на рис. 1.50.

На рис. 1.47 - 1.50 соблюдены однотипные обозначения связи графиков со скоростью вылета иона после последнего столкновения: 1-  $V=0.1 \cdot 10^4$  м/с, 2-  $V=0.5 \cdot 10^4$  м/с, 3-  $V=1 \cdot 10^4$  м/с, 4-  $V=2 \cdot 10^4$  м/с, 5-

6-  $V=3 \cdot 10^4$  м/с, 6-  $V=4 \cdot 10^4$  м/с, 7-  $V=5 \cdot 10^4$  м/с.

Общие тенденции относительно закономерностей изменения предельных углов вылета и входа в поверхность сводятся к следующему. Как и отмечалось выше,

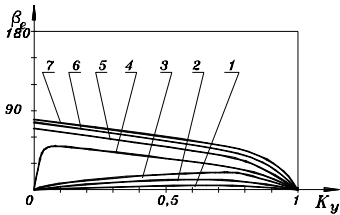


Рис. 1.49. Зависимость граничного угла вылета от относительной координаты ОКП и скорости вылета для атомарного азота

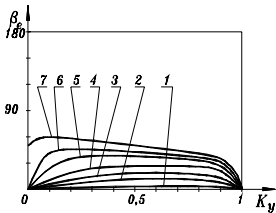


Рис. 1.50. Зависимость граничного угла вылета от относительной координаты ОКП и скорости вылета для молекулярного водорода

применение относительной безразмерной координаты ПСП значительно упрощает анализ результатов расчета, поскольку состав газовой среды, межэлектродный потенциал, плотность тока и температура практически не влияют на вид графиков (разность по каждому из них составляет 1...4 градуса или не больше 4%

в относительном измерении). Наиболее существенным фактором влияния является скорость вылета  $V$ . Чем меньшая скорость вылета, тем больше предельный угол вылета и наоборот для угла входа. Характер, пусть и незначительного, влияния давления газа полностью совпадает с отмеченным раньше при исследовании электрических параметров

процесса [11]: при изменении давления от 0,5 тор до 1,5 тора предельный угол вылета  $\beta_b$  сначала уменьшается (минимум – при  $p=0,9$  тора, что является полным аналогом экстремума, отмеченного в электрических характеристиках), а потом возрастает. Для угла входа  $\beta_e$  характер изменений тоже экстремальный, но наоборот: сначала угол возрастает к максимальному значению, потом уменьшается. Чем меньшая масса частицы, тем угол  $\beta_b$  больше при одинаковых других условиях, межэлектродный потенциал  $U$ , возрастая, увеличивает предельный угол вылета. Причиной обоих явлений есть то, что при увеличении напряженности поля или при уменьшении массы более вероятной становится возможность более крутой траектории иона, т.е. и при больших углах вылета ион может быть более резко повернут так, чтобы при длине траектории, равной

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
 СДСП, достичь поверхности. Влияние напряженности и массы на предельный угол входа в поверхность противоположный, поскольку при росте напряженности или уменьшении массы траектория иона в более крутая, приближаясь к нормали, а угол входа в поверхность уменьшается.

Анализ результатов расчета показывает, что предельный угол вылета может определяться

$$\beta_b(K_y, v) = \begin{cases} K_{v1}(v) - K_{v2}(v)K_y + K_{v3}(v)K_y^2 - K_{v4}(v)K_y^3 & \text{при } K_y < 1, \\ 0 & \text{при } K_y = 1 \end{cases} \quad (5)$$

$K_{v1} \dots K_{v4}$  – числовые коэффициенты полинома,

$v$  – аналог скорости вылета, введенный для удобства применения формул расчета числовых коэффициентов,  $v = V \cdot 10^{-4}$  м/с.

Общий характер изменения числовых коэффициентов

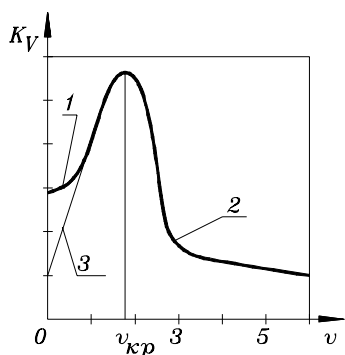


Рис. 1.51. Влияние на числовые коэффициенты аналога скорости

полинома при изменении аналога скорости в пределах до 5 м/с показан на рис. 1.51, причем график может моделироваться уравнением вида

$$K_V = a + bve^{-cv^d}, \quad (6)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  – коэффициенты, которые зависят от аналога скорости.

Следует отметить, что точность подобного моделирования даже при высоких корреляционных отношениях (около 0,98)

недостаточна, прежде всего на участке 1, который превращается почти в прямую 3. Поэтому с целью повышения адекватности отображения зависимости она моделировалась отдельно для двух участков 1 и 2, причем для участка 1 использована показательная функция, для 2 – показательная со сшиванием значений в точке перегиба. Установлено, что для каждой зависимости  $K_V = K_V(v)$  существует критический аналог скорости  $v_{кр}$ , который отвечает точке перегиба кривой, причем чем большая масса иона, тем критический аналог скорости меньше. Таким образом, числовые коэффициенты в формуле (5) определяются в зависимости от значения аналога скорости



$$K_{Vi}(v) = \begin{cases} K_{V1i}(v) \text{ при } v \leq v_{кр}, \\ K_{V2i}(v) \text{ при } v > v_{кр} \end{cases}, \quad (7)$$

где  $K_{V1i}$ ,  $K_{V2i}$  – значение числовых коэффициентов, рассчитанных соответственно для первого и второго участков,

$$K_{V1i}(v) = a_{b1} + b_{b1}v^{c_{b1}}, \quad (8)$$

$$K_{V2i}(v) = a_{b2} - b_{b2} + b_{b2} \cdot (C^{-d})^{(v-v_{кр})} = a_{b2} - b_{b2}(1 - c_{b2}^{(v-v_{кр})}). \quad (9)$$

Значение коэффициентов, необходимых для расчета числовых коэффициентов для уравнений (5, 7...9) сведены в табл. 1.11.

Таблица 1.11

**Значение параметров расчета числовых коэффициентов  
функции предельного угла вылета для основных компонентов  
газовой среды**

Компо- нент	Критическая скорость $V_{кр} \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$	Коэффициент уравнений (5) и (7)	$a_{b1}$ или $a_{b2}$	$b_{b1}$ или $b_{b2}$	$c_{b1}$ или $c_{b2}$	Корреляционное отношение, не меньше
N <sub>2</sub>	0,75	$K_{V11}$	176.32	6.169	0,6299	0,9864
		$K_{V12}$	203.279	366.42	1,917	
		$K_{V13}$	269.984	648.206	1,8995	
		$K_{V14}$	147.69	336.32	1,409	
		$K_{V21}$	178.98	84.99	0,0556	0,9978
		$K_{V22}$	413.33	330.59	0,0449	
		$K_{V23}$	685.15	596.46	0,0736	
		$K_{V24}$	413.05	332.79	0,0974	
N	1,55	$K_{V11}$	173.97	5,91	0,185	0,9976
		$K_{V12}$	198.782	105,08	1,339	
		$K_{V13}$	262,569	201,22	1,5236	
		$K_{V14}$	146,03	141,03	1,3515	
		$K_{V21}$	192,9	93,27	0,0415	0,9984
		$K_{V22}$	421,62	327,41	0,0417	
		$K_{V23}$	715,88	593,36	0,0525	
		$K_{V24}$	439,78	333,91	0,0535	
Ar	0,65	$K_{V11}$	170.39	11,19	0,1644	0,9864
		$K_{V12}$	197,01	389,57	1,5366	
		$K_{V13}$	260,71	834,61	1,7454	
		$K_{V14}$	146,19	484,4	1,564	
		$K_{V21}$	182,14	88,235	0,016	0,9978
		$K_{V22}$	410,34	337,71	0,0222	
		$K_{V23}$	690,87	622,43	0,0285	
		$K_{V24}$	415,88	350,33	0,0399	
H <sub>2</sub>	3,25	$K_{V11}$	176,14	1,824	2,51	0,945
		$K_{V12}$	194,26	35,05	2,476	
		$K_{V13}$	244,49	86,14	2,5096	
		$K_{V14}$	134,21	71,81	2,389	
		$K_{V21}$	189,45	107,06	0,4888	0,9489
		$K_{V22}$	491,35	556,39	0,4496	
		$K_{V23}$	851,19	1066	0,4778	
		$K_{V24}$	515,27	630,97	0,4979	
H	> 5	$K_{V11}$	176,67	0	0	0,993
		$K_{V12}$	203,36	0,8865	3,1836	
		$K_{V13}$	266,52	0,2957	4,211	
		$K_{V14}$	151,89	0,1594	4,2844	

Предельный угол входа в поверхность определяется по формуле, которая несколько отличается от уравнения (5), прежде всего знаками возле числовых коэффициентов полинома

$$\beta_e(K_y, v) = \begin{cases} K_{v1}(v) + K_{v2}(v)K_y + K_{v3}(v)K_y^2 + K_{v4}(v)K_y^3 & \text{при } K_y < 1, \\ 0 & \text{при } K_y = 1 \end{cases} \quad (10)$$

Коэффициенты полинома в уравнении (10) выбираются аналогично формуле (7), однако, числовые коэффициенты для первого и второго участков рассчитываются на основе формул (11), (12) и табл. 1.12.

$$K_{v1i}(v) = a_{e1} v^{b_{e1}}, \quad (11)$$

$$K_{v2i}(v) = a_{e2} - b_{e2} (1 - c_{e2}^{(v-v_{kp})}). \quad (12)$$

Координата точки последнего столкновения частицы, продуктивная с точки зрения достижения поверхности, в значительной степени влияет на энергетический уровень входа в поверхность, т.е. формирует ЭСПП. Однако при этом обязательно должны быть учтены вероятностные характеристики события достижения частицей катода после последнего столкновения в точке ПСП с относительной координатой  $K_y$ .

Исходя из условия, что координата точки столкновения приняла некоторое значение  $y$ , обозначим через  $A$  событие достижения активной частицей катода при условии, что столкновение состоялась именно в точке с координатой  $y$ , т.е. рассматриваемое столкновение есть последним в траектории движения данной частицы. Введем для удобства и упрощение процедуры анализа случайную величину  $Z$ , которая принимает одно с двух возможных значений:  $Z=1$  в случае, когда событие  $A$  имеет место, и  $Z=0$  – в случае, если событие  $A$  не состоялась. Кроме того введем обозначение вероятности события  $A$   $P(A) = P_1$  и вероятность противоположного события (столкновение оказалась не последним и частица катоду не достигла)  $P(\bar{A}) = 1 - P_1 = P_0$ . Тогда выражение для условного распределения вероятности случайной величины  $Z$  при том, что столкновение состоялась в точке с координатой  $y$ ,

$$w(Z/y) = P_1 \delta_D(Z-1) + P_0 \delta_D(Z), \quad (13)$$

где  $\delta_D(Z)$  - дельта-функция Дирака.

Условие нормирования на единицу в этом случае обязательно будет выполняться, поскольку площадь дельта-функции равняется единице ( $\int_{-\infty}^{\infty} w(Z/y) dZ = 1$ ).

**Числовые коэффициенты для расчета функции предельного  
угла входа в поверхность**

Компонент	Критическая скорость $V_{кр} \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$	Коэффициент для уравнений (10) и (7)	$a_{e1}$ или $a_{e2}$	$b_{e1}$ или $b_{e2}$	$c_{e2}$	Корреляционное отношение, не меньше
N <sub>2</sub>	0,82	$K_{V11}$	62,897	8,05	-	0,9864
		$K_{V12}$	267,54	1,61	-	
		$K_{V13}$	-588,48	2,372	-	
		$K_{V14}$	333,97	3,08	-	
		$K_{V21}$	9,844	-79,44	0,0169	0,9835
		$K_{V22}$	208,02	297,73	0,00641	
		$K_{V23}$	-400,17	-498,73	0,007	
		$K_{V24}$	203,47	290,18	0,0088	
N	1,52	$K_{V11}$	0,45	7,77	-	0,9862
		$K_{V12}$	91,87	1,71	-	
		$K_{V13}$	-129,14	2,4241	-	
		$K_{V14}$	466,64	3,154	-	
		$K_{V21}$	-4,59	-89,53	0,0061	0,9825
		$K_{V22}$	711,82	790,47	0,0014	
		$K_{V23}$	-1431,4	-1508,1	0,000777	
		$K_{V24}$	402,27	480,01	0,0113	
Ar	0,7	$K_{V11}$	248,28	8,19	-	0,986
		$K_{V12}$	334,39	1,464	-	
		$K_{V13}$	-783,52	2,083	-	
		$K_{V14}$	471,47	2,647	-	
		$K_{V21}$	4,35	-84,11	0,00344	0,982
		$K_{V22}$	243,53	327,27	0,000527	
		$K_{V23}$	-492,76	-570,82	0,000156	
		$K_{V24}$	255,78	332,28	0,000498	
H <sub>2</sub>	3,4	$K_{V11}$	0,0655	4,2912	-	0,9854
		$K_{V12}$	13,046	2,059	-	
		$K_{V13}$	-5,12	3,282	-	
		$K_{V14}$	0,3005	4,8863	-	
H <sub>2</sub>	3,4	$K_{V21}$	12,5	-69,23	0,3249	0,982
		$K_{V22}$	162,1	363,5	0,5174	
		$K_{V23}$	-283,98	-711,93	0,6153	
		$K_{V24}$	118,79	343,03	0,5508	
H	> 5	$K_{V11}$	0,9508	0,7077	-	0,97
		$K_{V12}$	1,7332	2,7965	-	
		$K_{V13}$	-0,1307	4,7327	-	
		$K_{V14}$	0,0217	5,382	-	

Совместное распределение вероятности случайных величин  $Z$  и  $y$ , учитывая, что  $y$  имеет равномерное распределение и если обозначить для удобства  $Y = \bar{l}$ ,

$$w(Z, y) = \begin{cases} w(Z/y)w(y) = [P_1 \delta_D(Z-1) + P_0 \delta_D(Z)] \cdot \frac{1}{Y} & \text{при } 0 \leq y \leq Y. \\ 0 & \text{при } y < 0 \vee y > Y \end{cases} \quad (14)$$

Безусловное распределение вероятности случайной величины  $Z$

$$w(Z) = \int_{-\infty}^{\infty} w(Z, y) dy = \int_0^Y [P_1 \delta_D(Z-1) + P_0 \delta_D(Z)] \cdot \frac{1}{Y} dy \quad (15)$$

При переходе к нормированной переменной  $K_y = y/Y$

$$\begin{aligned} w(Z) &= \int_0^1 [P_1 \delta_D(Z-1) + P_0 \delta_D(Z)] \cdot dK_y = \delta_D(Z-1) \int_0^1 P_1 dK_y + \delta_D(Z) \int_0^1 P_0 dK_y = \\ &= \delta_D(Z-1) \int_0^1 P_1 dK_y + \delta_D(Z) \int_0^1 (1 - P_1) dK_y = \delta_D(Z-1) \int_0^1 P_1 dK_y + \delta_D(Z) - \delta_D(Z) \int_0^1 P_1 dK_y = \\ &= \delta_D(Z) + [\delta_D(Z-1) - \delta_D(Z)] \int_0^1 P_1 dK_y \end{aligned} \quad (16)$$

Тогда по аналогии с (14) условное распределение вероятностей

$$w(K_y / Z) = \begin{cases} \frac{w(Z, K_y)}{w(Z)} = \frac{[P_1 \delta_D(Z-1) + P_0 \delta_D(Z)]}{\delta_D(Z) + [\delta_D(Z-1) - \delta_D(Z)] \int_0^1 P_1 dK_y} \text{ при } 0 \leq K_y \leq 1 \\ 0 \text{ при } K_y < 0 \vee K_y > 1 \end{cases} \quad (17)$$

Для задачи, которая рассматривается, практический интерес имеют те значения распределения вероятности, которые отвечают условию когда событие  $A$  реализовано, т.е. частица достигла после столкновения катода ( $Z=1$ ). В этом случае

$$w(K_y / 1) = \begin{cases} \frac{P_1 \delta_D(Z-1)}{\delta_D(Z-1) \int_0^1 P_1 dK_y} = \frac{P_1}{\int_0^1 P_1 dK_y} \text{ при } 0 \leq K_y \leq 1 \\ 0 \text{ при } K_y < 0 \vee K_y > 1 \end{cases} \quad (18)$$

Условие нормирования распределения вероятности выполняется, так как  $\int_0^1 w(K_y / 1) dK_y = \int_0^1 P_1 dK_y / \int_0^1 P_1 dK_y = 1$

Аналогичные результаты можно получить на основе теоремы о перемножении вероятностей, хотя эти выкладки при большей простоте не совсем строго отвечают формальной постановке вероятностных соотношений (отсутствует переменная, которая бы отображала возможный факт недостижения частицей катода)

$$P(A, K_y) = P(A / K_y) \cdot w(K_y) dK_y = w(K_y / A) dK_y \cdot P(A), \quad (19)$$

где  $P(A, K_y)$  - совместная вероятность события  $A$  и вылета частицы из элемента  $dK_y$  в окрестностях координаты  $K_y$ ,

$w(K_y)$  - распределение вероятности столкновения в точке  $K_y$ ,

$P(A / K_y)$  - вероятность достижения поверхности при старте с точки  $K_y$ ,

$w(K_y / A)$  - распределение вероятности  $K_y$  при условии  $A$ .

Тогда распределение вероятности относительной координаты

$K_y$  при условии достижения частицей катода после последнего столкновения в точке с этой координатой

$$w(K_y / A) = \frac{P(A, K_y)}{P(A) \cdot dK_y} = \frac{P(A / K_y) \cdot w(K_y) \cdot dK_y}{P(A) \cdot dK_y} = \frac{P(A / K_y) \cdot w(K_y)}{\int_0^1 P(A / K_y) \cdot w(K_y) dK_y} \quad (20)$$

Но распределение вероятностей случайной относительной координаты столкновения  $K_y$  определяется как

$$w(K_y) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq K_y \leq 1 \\ 0 & \text{при } K_y < 0 \vee K_y > 1 \end{cases} \quad (21)$$

Тогда

$$w(K_y / A) = \begin{cases} \frac{P(A / K_y)}{\int_0^1 P(A / K_y) dK_y} & \text{при } 0 \leq K_y \leq 1 \\ 0 & \text{при } K_y < 0 \vee K_y > 1 \end{cases} \quad (22)$$

Для каждой конкретной координаты

$$P(K_y / A) = \int_0^{\beta_b} w_\beta(\beta) d\beta + \int_{2\pi - \beta_b}^{2\pi} w_\beta(\beta) d\beta \quad (23)$$

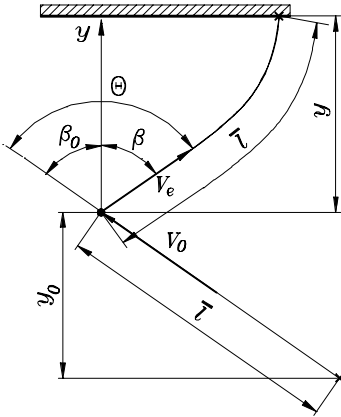


Рис. 1.52 Схема для расчета скорости вылета частицы

Тем не менее, в приведенной выше модели пока что не учтен энергетический фактор, поскольку предельный угол вылета зависит не только от относительной координаты ПСП, но и от скорости вылета, которая в свою очередь также является величиной случайной. Схема для учета скорости вылета частицы показана на рис. 1.52. Опосредствованная частица проходит между столкновениями путь, который равняется СДСП, и входит в последнее столкновение под

углом  $\beta_0$  к вектору поля с начальной энергией  $\varepsilon_0$ , которая определяется через разность потенциалов поля в точках предпоследней и последней столкновений

$$\varepsilon_0 = q_e(\varphi_0 - \varphi_y) \quad (24)$$

При линейном законе изменения напряженности поля

потенциал в точке с координатой  $y$  рассчитывается

$$\varphi_y = 2U \left( \frac{y}{\delta} - \frac{y^2}{2\delta^2} \right), \quad (25)$$

где  $U$  – межэлектродный потенциал,

$\delta$  - ширина ОКП.

Учитывая, что потенциал поля в точке предпоследнего столкновения определяется

$$\varphi_0 = U \left( \frac{2\delta(y + y_0) - (y + y_0)^2}{\delta^2} \right), \quad (26)$$

где  $y_0 = \bar{l} \cdot \cos \beta_0$ , то энергия входа в последнее столкновение

$$\varepsilon_0 = q_e U \frac{2\delta \cdot y_0 - 2yy_0 - y_0^2}{\delta^2}. \quad (27)$$

Приведенная зависимость весьма усложнит дальнейшие выкладки без крайней в том необходимости. Последнее обосновывается тем, что в первом от катоде ПСП, ширина которого приблизительно составляет меньше 10% ширины ОКП, падение потенциала достигает от 20 до 40%, т.е. потенциал поля изменяется очень резко. Это обстоятельство разрешает принять в пределах первого ПСП и его окрестностей линейный закон изменения потенциала поля. Закон изменения потенциала поля тогда примет вид

$$\varphi(y) = \frac{y}{Y} \varphi_Y, \quad (28)$$

где  $\varphi_Y$  – потенциал поля на границе первого ПСП, который определяется

$$\varphi_Y = 2U \left( \frac{Y}{\delta} - \frac{Y^2}{2\delta^2} \right). \quad (29)$$

Энергия, которую получит частица в результате бесстолкновительного пролета первого ПСП

$$\varepsilon_1 = q_e \varphi_Y, \quad (30)$$

а энергия направленного к катоду движения при старте с произвольной точки  $y$

$$\varepsilon_y = K_y \varepsilon_1 = K_y q_e \varphi_Y. \quad (31)$$

Полная энергия частицы, которая достигла катода

$$\varepsilon_K = \varepsilon_y + \varepsilon_{ek}, \quad (32)$$

где  $\varepsilon_{ek}$  – составляющая энергии вылета после столкновения в направлении движения к катоду.

При скорости вылета  $V$  и энергии вылета  $\varepsilon_e$  согласно рис. 1.53

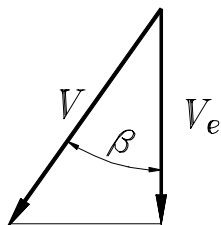


Рис. 9 Схема для расчета энергии направленного к катоду движения

$$\varepsilon_{ek} = \frac{mV_e^2}{2} = \frac{mV^2 \cos^2 \beta}{2} = \varepsilon \cos^2 \beta, \quad (33)$$

где  $\varepsilon$  - энергия частицы после вылета из столкновения,

$m$  - масса исследуемой частицы.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \Delta\varepsilon, \quad (34)$$

где  $\Delta\varepsilon$  - потери энергии в последней столкновении.

С учетом упрощений в связи с введением линейного закона распределения потенциала

$$\varphi_0 = \frac{Y + Y \cos \beta_0}{Y} \varphi_Y. \quad (35)$$

Тогда

$$\varepsilon_0 = q_e(\varphi_0 - \varphi_Y) = q_e \left( \frac{Y + Y \cos \beta_0}{Y} \varphi_Y - \frac{\varepsilon_1}{q_e} \right) = \frac{Y + Y \cos \beta_0}{Y} \varphi_Y q_e - \varepsilon_1 = \varepsilon_1 \cos \beta_0 \quad (36)$$

Для определения энергетических потерь в последнем столкновении учтено, что ионы неупругих потерь энергии не имеют [2, с. 98]. Таким образом, энергетический обмен при столкновении иона с нейтральной частицей (в низко ионизированной плазме столкновения заряженных частиц практически невозможны) может определяться с помощью модели, основными допущениями которой есть:

а) частицы, принимающие участие в столкновении моделируются как абсолютно твердые шары, а это приемлемо, если учесть, что фактически никаких непосредственных столкновений не происходит, активная частица приближается к контрчастице с некоторым прицельным параметром относительно направления движения, потом поворачивает на определенный угол, сохраняя все тот же прицельный параметр относительно нового направления движения [12];

б) массы частиц сосредоточены в одной точке, которая есть их центром масс;

в) удар в общем случае косой, нецентральный и абсолютно упругий;

г) вероятность столкновения частиц регламентируется эффективным (газокинетическим) сечением, поскольку учет дополнительных сил, возникающих при взаимном движении иона и нейтральной частицы имеет смысл только относительно пары комбинаций таких частиц, в реальном газе ион движется в системе

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
нейтральных частиц, взаимоотношения сил абсолютно не прогнозируемы, в усредненном варианте - взаимно нейтрализующее, и включение их в рассмотрение принципиально усложнит модель процессами второго порядка вплоть до невозможности ее решения, не улучшая при этом адекватность модели и действительности.

Для подобных условий потери энергии в каждом „эффективном” столкновении определяются [2, с. 42]

$$\Delta\varepsilon = \frac{2m_1m_2}{(m_1 + m_2)^2} \left( \varepsilon_0 - \varepsilon_2 + \frac{m_2m_1}{2} \overline{V_1V_2} \right), \quad (37)$$

где  $\varepsilon_2$  – энергия контрчастицы после последнего столкновения,

$m_1, m_2$  – массы активной и контрчастиц,

$\overline{V_1, V_2}$  - скорости активной и контрчастиц.

Поскольку речь идет о столкновениях активной частицы, скорость которой по порядку величин  $10^4 \dots 10^5$  м/с, с контрчастицей, находящейся в состоянии теплового движения, то следует заметить, что средняя скорость теплового движения может определяться [2, с. 579]

$$V_{mt} = 1,45 \cdot 10^2 \sqrt{\frac{T(K)}{A_m}}, \quad (38)$$

т.е. при температуре газа даже  $T=900^\circ\text{K}$  для азота с относительной атомарной массой  $A_m=14$  скорость теплового движения составляет  $11,62 \cdot 10^2$  м/с, для аргона ( $A_m=40$ ) -  $6,87 \cdot 10^2$  м/с. Таким образом, скорость контрчастиц на два...три порядка меньше скорости активной частицы и поэтому их можно считать условно неподвижными. С таким допущением формула (37) упрощается

$$\Delta\varepsilon = \frac{2m_1m_2}{(m_1 + m_2)^2} \varepsilon_0. \quad (39)$$

С учетом того, что столкновение абсолютно упругое, а активная частица может входить в столкновение под углом  $\beta_0$ , двигаться после удара под произвольным углом  $\beta$  к вектору поля, окончательно энергетические потери

$$\Delta\varepsilon = \frac{2m_1m_2}{(m_1 + m_2)^2} (1 - \cos(\beta + \beta_0)) \varepsilon_0 = \frac{2m_1m_2}{(m_1 + m_2)^2} (1 - \cos(\theta)) \varepsilon_0. \quad (40)$$

С целью упрощения дальнейших выкладок при исследовании вероятностных характеристик влияния угловых параметров столкновения введем дополнительные обозначения:

$$K_\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0} \text{ - коэффициент относительной потери энергии в}$$

результате столкновения,



$$C_m = \frac{2m_1m_2}{(m_1 + m_2)^2} - \text{коэффициент массового соотношения,}$$

$\theta = \beta + \beta_0$  - угол вылета после столкновения относительно направления входа в столкновение.

$$\text{Тогда } K_\varepsilon = C_m(1 - \cos \theta), \text{ и } \cos \theta = \frac{C_m - K_\varepsilon}{C_m} = 1 - \frac{K_\varepsilon}{C_m} = R,$$

откуда  $\theta = \arccos R$ . Но

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dK_\varepsilon} &= \frac{d\theta}{dR} \cdot \frac{dR}{dK_\varepsilon} = -\frac{1}{\sqrt{1-R^2}} \cdot \left(-\frac{1}{C_m}\right) = \\ &= \frac{1}{C_m \sqrt{1 - \left(1 - \frac{K_\varepsilon}{C_m}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2C_m K_\varepsilon - K_\varepsilon^2}} \end{aligned} \quad (41)$$

Из равенства вероятностей

$$w_\theta(\theta)d\theta = w_K(K_\varepsilon)dK_\varepsilon, \quad (42)$$

поэтому распределение вероятности коэффициента относительной потери энергии

$$w_K(K_\varepsilon) = w_\theta(\theta) \left| \frac{d\theta}{dK_\varepsilon} \right| = w_\theta(\theta) \cdot \left| \frac{1}{\sqrt{2C_m K_\varepsilon - K_\varepsilon^2}} \right|. \quad (43)$$

Поскольку распределение вероятности углов вылета частицы после столкновения - аналогично формуле (2), но с учетом сферической симметрии среды вокруг точки столкновения угол  $\theta$  будет изменяться в пределах от 0 до  $2\pi$ , то

$$w_\theta(\theta) = \frac{1}{4} \left| \sin \frac{\theta}{2} \right| = \frac{1}{4} \left| \sin \frac{\arccos \left(1 - \frac{K_\varepsilon}{C_m}\right)}{2} \right|, \quad (44)$$

а распределение вероятности коэффициента относительной потери энергии с учетом двузначности обратной зависимости  $\theta = \theta(K_\varepsilon)$ , что соответствует двум симметричным относительно вектора поля секторам,

$$w_K(K_\varepsilon) = \frac{1}{2} \left| \sin \frac{\arccos \left(1 - \frac{K_\varepsilon}{C_m}\right)}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2C_m K_\varepsilon - K_\varepsilon^2}} \right|. \quad (45)$$

Таким образом, коэффициент относительной потери энергии

изменяется в диапазоне  $0 \leq K_\varepsilon \leq 2C_m$  (условие нормирования

$$\int_0^{2C_m} w_K(K_\varepsilon) dK_\varepsilon = 1 \text{ выполняется.}$$

Используя дополнительные обозначения, формула (34) переписывается

$$\varepsilon = \varepsilon_0(1 - K_\varepsilon) = \varepsilon_0(1 - C_m(1 - \cos\theta)) = \varepsilon_0(1 - C_m + C_m \cos\theta) \quad (46)$$

Скорость вылета частицы с последнего столкновения

$$V = V(\theta) = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{m}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0(1 - C_m + C_m \cos\theta)}{m}}. \quad (47)$$

При равенстве масс частиц  $m_1 = m_2$  коэффициент массового

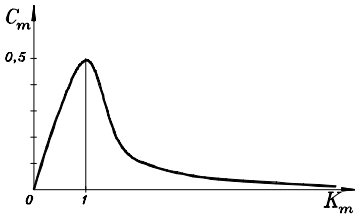


Рис. 1.54. Характер изменения коэффициента массового соотношения

соотношения  $C_m=0,5$ , поэтому при лобовом ударе ( $\theta=\pi$ ) энергия и скорость вылета из столкновения равны нулю. Если выразить массу контрчастицы через массу инициатора столкновения

$$m_2 = K_m m_1, \text{ то } C_m = \frac{2 K_m}{(1 + K_m)^2}$$

и характер изменения коэффициента массового соотношения соответствует рис. 1.54, а коэффициента относительной потери энергии - рис. 1.55. Влияние изменения угла вылета на скорость частицы после столкновения показана на рис. 1.56.

В общем случае, когда  $K_m \neq 1$ , минимальное значение скорости отвечает энергии частицы

$$\varepsilon_\pi = \varepsilon_0(1 - 2C_m), \quad (48)$$

поэтому минимальная скорость рассчитывается

$$V_\pi = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0(1 - 2C_m)}{m}} = V_0 \sqrt{\frac{1 - 2C_m}{m}}. \quad (49)$$

При равенстве масс инициатора столкновения и контрчастицы,

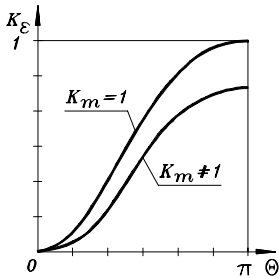


Рис. 1.55. Характер изменения коэффициента относительной потери энергии

как было показано выше, минимальная скорость равна нулю.

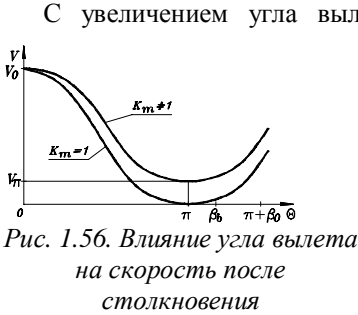


Рис. 1.56. Влияние угла вылета на скорость после столкновения

С увеличением угла вылета скорость после столкновения сначала уменьшается до минимального значения, потом увеличивается. Тем не менее, условие достижения частицей катода как критерий того, что это столкновение - последнее, предполагает, что угол вылета не должен превышать предельного значения. Тогда компромисс будет достигнут

при условии

$$\theta - \beta_0 = \beta_b = \beta_b (K_y, V(\theta)) = \beta_b \left( K_y, \sqrt{\frac{\varepsilon_0 (1 - C_m + C_m \cos \theta)}{m}} \right) \quad (50)$$

Решение уравнения (50) относительно предельного угла  $\beta_b$  позволит определить вероятность достижения частицей катода при условии вылета с точки, координата которой  $K_y$ ,

$$P(A/K_y) = \int_{\beta_0}^{\beta_b + \beta_0} w_\theta(\theta) d\theta + \int_{2\pi - (\beta_b - \beta_0)}^{2\pi + \beta_0} w_\theta(\theta) d\theta \quad (51)$$

Изложенное выше касается процессов, которые происходят в зоне первого от катода ПСП. Тем не менее, как отмечалось в начале, ЭСПП формируется также за счет частиц, которые могут долетать до катода из-за границ этого ПСП в результате бесстолкновительного движения.

В общем виде плотность потока частиц, которые попадают на катод

$$j_{ПК} = j_+ + j_V, \quad (52)$$

где  $j_+$  - плотность потока ионов всех сортов,

$j_V$  - плотность потока быстрых нейтральных частиц, возникающих в результате резонансной перезарядки.

Учитывая, что плотность тока на катодной и анодной границах ОКП одинаковая

$$j_+ q_e = j = j_{e\delta} q_e, \quad (53)$$

где  $j$  - плотность тока разряда,

$j_{e\delta}$  - поток электронов на анодной границе ОКП.

В стационарном установившемся режиме разряда количество заряженных частиц, которые покидают ОКП за единицу времени через единичную площадь как в сторону катода, так и анод равна потокам этих частиц и численно соответствует количеству

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
 заряженных частиц, которые генерируется в объеме ОКП с основанием в единичную площадь. При этом, учитывая особенности взаимного расположения анода и катода, считаем, что условий для дрейфа частиц в направлении, перпендикулярном вектору поля, нет, а также учитываем то обстоятельство, что при реально возможных характеристиках разряда, применяемого в означенных технологических процессах, практически все ионы - однозарядные, поскольку для тройных столкновений условий нет. Тогда изменение потока численно равно изменению количества заряженных частиц соответствующего знака и быстрых нейтральных частиц в отдельных слоях ОКП. Относительно изменений потока ионов как главных факторов формирования ЭСПП

$$dj_+ = dz_+ = dz_{u+} + dz_{p+}, \quad (54)$$

где  $dz_+$  - изменение количества ионов,

$dz_{u+}$  - изменение количества ионов за счет ионизации,

$dz_{p+}$  - изменение количества ионов за счет рекомбинации.

Поскольку, как было показано раньше [1], сечение рекомбинационных процессов на 10...12 порядков меньше сечения ионизации, то допустимо этой составляющей пренебречь, тем более, что столкновение заряженных частиц при низкой степени ионизации, как отмечалось выше, практически невозможно.

Изменение количества ионов за счет ионизации в элементарном объеме

$$dz_u = v_u(y) n_e(y) s dy, \quad (55)$$

где  $v_u(y)$  – частота ионизации, которая состоит соответственно из частот ионизации ударной и ступенчатой

$$v_u(y) = v_{uy}(y) + v_{uc}(y), \quad (56)$$

$s$  – единичная площадь.

В общем виде частота ионизационного процесса может определяться через приведенное сечение ионизации  $\sigma_{vu}$

$$v_u(y) = C_p p \overline{V_e(y)} \sigma_{vu}, \quad (57)$$

где  $C_p$  – константа концентрации компонента,  $C_p = \frac{1}{kT}$ , ( $k$  - постоянная Больцмана,  $T$ - термодинамическая температура),

$p$  – давление в разрядной камере,

$\overline{V_e(y)}$  - закон изменения средней скорости электронов по ширине ОКП [1],

$$\sigma_{vu} = \sum_1^i K_{pi} \sigma_{ui} (\overline{V_e(y)}), \quad (58)$$

где  $K_{pi}$  – коэффициент объемной доли компонента в газовой среде.

Введем обозначение:  $i$  – индекс сорта активной частицы,  $w$  – индекс сортов компонентов (контрчастиц). Тогда количество ионов определенного сорта, генерируемых в объеме  $sdx$  в единицу времени

$$\begin{aligned} dz_{+i} &= n_e(y) s dy v_u(y) = \\ &= n_e(y) s dy C_p K_{pi} p \overline{V_e(y)} \cdot (\sigma_{uyi} (\overline{V_e(y)}) + \sigma_{uci} (\overline{V_e(y)})), \end{aligned} \quad (59)$$

где  $\sigma_{uyi} (\overline{V_e(y)})$ ,  $\sigma_{uci} (\overline{V_e(y)})$  – сечения ударной и ступенчатой ионизации в определенной точке ОКП.

Количество частиц определенного сорта  $w$  в объеме от катода до точки  $y$  с основой  $s$

$$z_w = n_w s y = C_p p_w s y = C_p K_{pw} p s y, \quad (60)$$

поэтому вероятность столкновения иона сорта  $i$  на пути от точки ОКП  $y$  к катоду как отношения суммы газокинетических сечений столкновений к площади основания

$$P_{ci} = \frac{s_{ci}}{s} = \frac{\pi \sum_1^w (r_i + r_w)^2 z_w}{s} = C_p p y \cdot \pi \sum_1^w (r_i + r_w)^2 K_{pw}, \quad (61)$$

где  $r_i$ ,  $r_w$  – радиусы активной и контрчастиц.

Вероятность бесстолкновительного пробега исследуемого компонента

$$P_{0i} = 1 - P_{ci}. \quad (62)$$

Изменение потока ионов всех сортов в результате бесстолкновительного движения ионов, генерированных в окрестностях  $y$ ,

$$dj = \sum_1^i dz_{+i} P_{0i}. \quad (63)$$

Критическая координата, из которой еще возможен бесстолкновительное движение ионов данного сорта к катоду определяется из условия

$$P_{ci} = C_p p K_{pw} y_{Ki} \cdot \pi \sum_1^w (r_i + r_w)^2 = 1, \quad (64)$$

откуда критическое расстояние

$$y_{Ki} = \frac{1}{C_p \cdot p \cdot \pi \sum_1^w (r_i + r_w)^2 K_{pw}} \quad (65)$$

Поток ионов определенного сорта на катод в результате бесстолкновительного движения

$$j_i = \int_0^{y_{Ki}} n_e(y) s C_p K_{pi} p \overline{V_e(y)} \cdot (\sigma_{uyi}(\overline{V_e(y)}) + \sigma_{uci}(\overline{V_e(y)}) P_{0i}) \cdot \quad (66)$$

В общем виде концентрация электронов изменяется [4]

$$n_e(y) = \int \frac{dz_e(y)}{V_{se}(y) s} + C_{ne}, \quad (67)$$

где  $dz_e(y)$  – закон изменения количества электронов по ширине ОКП,

$V_{se}(y)$  – скорость скольжения электронов,

$C_{ne}$  – некоторая постоянная.

Основные опорные точки кривой  $n_e(y)$  известны: в окрестностях катода концентрация прыжком переходит от нулевого значения к начальной концентрации, формируемой вторичной ионно-электронной и термоэлектронной эмиссиями; на анодной границе ОКП концентрация рассчитывается, исходя из плотности тока разряда

$$n_e(y = \delta) = j_{ec} / q_e V_{se\delta}, \quad (68)$$

где  $j_{ec}$  – плотность тока разряда, А/м<sup>2</sup>,

$V_{se\delta}$  - скорость скольжения электронов на анодной границе ОКП.

Прямое использование формулы (67) проблематично прежде всего потому, что для определения прироста количества электронов нужно знать именно закон изменения концентрации этих электронов. Выход из этой ситуации возможен за счет следующего упрощения - при известных значениях опорных точек принять определенный закон изменения концентрации электронов, учитывая имеющийся экспериментальный и расчетный материал. На рис. 1.57 показаны варианты изменения концентрации электронов по ширине ОКП. График 1 соответствует расчету концентрации электронов по программе, аналитическое обоснование которой приведено в [1]. Зависимость 2 как гипотетическая демонстрация качественных характеристик ионизационных процессов в ОКП приведена в [13]. Из рис. 1.57 очевидно, что линейная аппроксимация концентрации электронов 3 может применяться только в первом приближении. Кривым 1 и 2 более всего соответствует формула вида

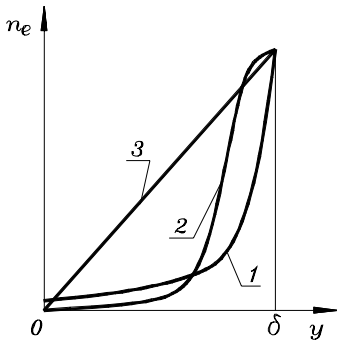


Рис. 1.57. Общий вид закономерностей изменения концентрации электронов в ОКП

$$n_e(y) = n_{eK} + a y^b, \quad (69)$$

где  $n_e$  – начальная концентрация электронов в окрестности катода, по порядку величин  $n_e = 10^{10} \text{ м}^{-3}$ ,

$a$ ,  $b$  – числовые коэффициенты, по порядку величин  $a=8...10$ ,  $b=16...20$  (при условии, что  $y$  – в миллиметрах),  $a=3...4$ ,  $b=6...7$  (при условии, что вместо координаты  $y$  используется безразмерная величина номера слоя при общем их количестве в ОКП 50).

Конечная концентрация электронов на анодной границе ОКП по порядку величин  $n_{e\delta} = (3...6) \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$  соответственно при плотности электрического тока  $j_{ec\delta} = 10...20 \text{ А/м}^2$ .

Быстрые нейтральные частицы возникают вследствие резонансной перезарядки, которая не изменяет общего количества заряженных частиц, т.е. ионов (при этом учтено, что в исследуемых технологиях нет условий для образования многозарядных ионов). Для движения иона в собственном газе процесс резонансной перезарядки имеет решающее значение, прежде всего потому, что сечение перезарядки в среднем на порядок больше сечения ионизации, практически во всем диапазоне скоростей иона (за исключением очень малых значений) оно превышает даже газокинетическое. Эффективность резонансной перезарядки объясняется прежде всего тем, что скорость электрона, как было показано выше, намного больше скорости иона, по этой же причине практически не наблюдается обмен импульсом и энергией, т.е. именно так, как это имеет место при упругом столкновении [2]. Сечение резонансной перезарядки по порядку величин асимптотично приближается с увеличением скорости к значениям  $20...30 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$  соответственно для водорода ...аргона. Возможна и перезарядка разнородных частиц, однако она имеет одноразовый характер, так как идет только в направлении уменьшения потенциала ионизации, этот процесс относится к неупругим.

Качественная картина изменения концентрации ионов [13, с. 175, 177] указывает на стабилизацию ее в окрестности катода или даже на некоторое ее снижение. Плотность ионного и электронного

токов изменяется по разному: электронный ток при отдалении от катода возрастает по показательной зависимости, ионный при приближении к катоду увеличивается по потенциальной. Исходя из этого, а также учитывая, что ширина слоя ОКП, в котором возможно бесстолкновительное достижение ионом, который возник в результате резонансной перезарядки, катода, меньше СДСП (ширины ПСП), допустимо считать концентрацию ионов в окрестности катода постоянной.

Как было показано выше, потери энергии при каждом столкновении настолько значительные, что нейтральная частица, возникшая в результате резонансной перезарядки, очень быстро снижает свой энергетический уровень к состоянию, соответствующему тепловому движению. Поэтому можно считать, что реальные шансы достижения катода имеют только быстрые нейтральные частицы, возникшие в первом от катода ПСП. При этом вероятностные характеристики определяются из условия, что все новые ионы, образованные в результате резонансной перезарядки в первом ПСП, долетают до катода, их энергия в момент вхождения в поверхность может определяться как  $\varepsilon_y$ , угол входа в поверхность относительно вектора поля равняется нулю. Усредненные быстрые нейтральные частицы (для сокращения – нейтралы), образованные при этом, могут гарантировано без столкновений долететь до катода только из слоя, ширина которого составляет  $y_0 = \bar{l} \cdot \cos \beta_0$  и который назовем прослойкой бесстолкновительного движения нейтралов - ПБДН, при этом они будут иметь среднюю энергию  $\varepsilon_0$ , рассчитанную по формуле (36). Кроме того, к катоду могут долететь, но уже в результате столкновительного движения, быстрые нейтралы, которые возникли в следующем за ПБДН слое, вероятностные характеристики этого процесса определяются аналогично приведенной выше методике для частиц, которые достигли катода в результате движения со столкновениями.

Таким образом, плотность потока быстрых нейтральных частиц

$$j_V = j_{VP} + j_{VC}, \quad (70)$$

где  $j_{VP}$  – поток быстрых нейтралов, возникших в результате резонансной перезарядки и достигли катода без столкновений,

$j_{VC}$  – поток быстрых нейтралов, которые возникли за пределами ПБДН и достигли катода со столкновениями.

Что касается резонансной перезарядки, которая имеет место в другой части ОКП за пределами этих двух слоев, то образованные при этом ионы будут себя вести абсолютно аналогично ионам, которые возникли в результате ионизационных процессов, т.е.



смогут достигать катода в результате бесстолкновительного движения или движения со столкновениями, быстрые же нейтралы как усредненные частицы практически не имеют никаких шансов долететь до катода.

Поток нейтралов определенного сорта с бесстолкновительным движением к катоду численно равняется, учитывая допущение о стабильной концентрации ионов в окрестности катода, количеству нейтралов, возникших в ПБДН в результате резонансной перезарядки

$$j_{V_{pi}} = n_{+i} s \bar{l} \cos \beta_0 v_{pni}, \quad (71)$$

где  $n_{+i}$  – концентрация ионов определенного сорта,

$v_{pni}$  – частота актов резонансной перезарядки, рассчитываемая

$$v_{pni} = C_p p K_{pi} \overline{V_{+i}} \sigma_{pni}(\overline{V_{+i}}), \quad (72)$$

$\overline{V_{+i}}$  – средняя скорость иона в момент резонансной перезарядки,

$\sigma_{pni}(\overline{V_{+i}})$  – сечение резонансной перезарядки при средней скорости.

Концентрация ионов может быть определена через составляющую плотности ионного тока  $j_{+i}$

$$n_{+i} = \frac{j_{+i}}{q_e V_{s+Ki}}, \quad (73)$$

где  $V_{s+Ki}$  – скорость дрейфа иона в окрестности катода, которая зависит от подвижности ионов в этой части ОКП  $\mu_{+K}$  и напряженности поля возле катода  $E_K$

$$V_{s+K} = \mu_{+K} E_K, \quad (74)$$

$$\mu_{+K} = \frac{q_e}{m_+ V_+ C_p p \sigma_{vc+}} \quad (75)$$

где  $m_+$  – масса иона,

$\sigma_{vc+}$  – эквивалентное сечение столкновений иона с компонентами газа.

$$\sigma_{vc+} = \sum_1^w \pi (r_+ + r_w)^2 K_{pw}, \quad (76)$$

где  $r_+$ ,  $r_w$  – радиусы иона и частиц компонентов газовой среды.

Средняя скорость иона определенного сорта рассчитывается через его среднюю энергию, если принять во внимание, что оперируем понятием усредненной частицы

$$\bar{V}_+ = K_{VE} \sqrt{\varepsilon_0}, \quad (77)$$

где  $K_{VE}$  – числовой коэффициент в м/с, для аргона –  $2,195 \cdot 10^3$ , для молекулярного азота –  $2,622 \cdot 10^3$ , для атомарного азота –  $3,708 \cdot 10^3$ , для молекулярного водорода –  $9,78 \cdot 10^3$  и для атомарного водорода –  $13,83 \cdot 10^3$ .

$$j_{+i} = \frac{\sigma_i j_{ec}}{\sum \sigma_i}, \quad (78)$$

где  $\sigma_i$  – сечение процесса, в результате которого образуются ионы данного сорта,

Вышеприведенные формулы учитывают только контрчастицы „своего” сорта, поскольку, как отмечалось раньше, резонансная перезарядка между частицами разных сортов может проходить только в направлении снижения потенциала ионизации. Но этот показатель для атомарного водорода составляет 13,6 эВ, для молекулярного водорода – 15,4 эВ, для атомарного и молекулярного азота соответственно 14,5 и 15,6 эВ и для аргона – 15,8 эВ, поэтому резонансная перезарядка от аргона возможная со всеми видами частиц, от молекулярного азота – с атомарным азотом и всеми водородными, от атомарного азота – с атомарным водородом, от молекулярного водорода – только с атомарным водородом. С учетом состава газовых сред, которые могут применяться в исследуемых технологиях, реальное значение могут иметь только перезарядка аргона на азоте и молекулярного азота на атомарном. Оценим весомость этих процессов на примере. При температуре газа  $T=773^\circ\text{K}$  и давлению  $p=1$  тор= $133,32$  Н/м<sup>2</sup> коэффициент  $C_p=9,368$  1/Нм. По порядку величин  $\bar{V}_+ = 10^4$  м/с,  $\sigma_{pn}=30 \cdot 10^{-20}$  м<sup>2</sup>,  $\nu_{pn}=(3\dots7,5) \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup>. Ширина ПСП приблизительно становит  $\bar{l}=0,0001$  мм, ориентировочное значение начального угла  $\beta_0=40^\circ$  [14], тогда ширина ПБДН  $y_0=7,7 \cdot 10^{-5}$  м. При напряженности поля около катода  $E_K \approx 10^5$  В/м, эквивалентном сечении столкновений молекулярного азота в смеси N75Ar25  $\sigma_{vc+}=43,86 \cdot 10^{-20}$  м<sup>2</sup> [14] подвижность ионов азота  $\mu_{+N2}=6,28 \cdot 10^{-2}$  А·м/Н, скорость дрейфа  $V_{s+N2}=6,28 \cdot 10^3$  м/с, время движения через ПБДН –  $1,22 \cdot 10^{-8}$  с. Тогда количество актов резонансной перезарядки в слое достигнет значения 9,15. Поэтому для упрощения методики, а также с учетом реального соотношения состава сортов частиц, учет перезарядки на частицах иного сорта может выполняться путем введения поправочного коэффициента порядка 1,1...1,3.

Схема для рассмотрения взаимодействия с поверхностью

нейтральных частиц, двигающихся со столкновениями приведена на рис. 1.58, где через  $Y = \bar{l} \cdot \cos \beta_0$  обозначена ширина ПБДН. В этом случае к катоду имеет возможность долететь только та часть потока

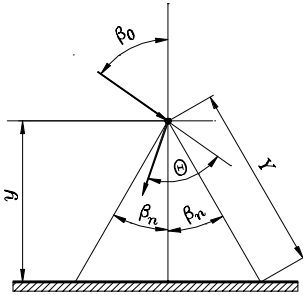


Рис. 1.58. Схема для исследования нейтралов столкновительного движения

нейтралов, рассчитанного по формуле (71), как образовавшихся в результате резонансной перезарядки в одном ПБДН, которая попадает после столкновения в сектор  $2\beta_n$ . Из рис. 1.58 следует

$$\beta_n = \arccos \frac{y}{Y} = \arccos K_y \quad (79)$$

Поскольку распределение вероятности углов отражения

$$w_\theta(\theta) = \frac{1}{4} \left| \sin \frac{\theta}{2} \right|, \quad (80)$$

то в каждой точке первого ПСП ОКП вероятность достижения

нейтральными частицами столкновительного движения катода

$$P(A/K_y) = \int_{\beta_0 - \beta_n}^{\beta_0 + \beta_n} w_\theta(\theta) d\theta = \frac{1}{4} \int_{\beta_0 - \beta_n}^{\beta_0 + \beta_n} \left| \sin \frac{\theta}{2} \right| d\theta. \quad (81)$$

Следует заметить, что в отличие от [12, с. 49, 15, с. 17], где принятое условие равновероятности всех углов отражения, распределение по формуле (80) [14] более реально отображает ситуацию. Учитывая, что соотношение углов  $\beta_0$  и  $\beta_n$  может быть произвольным, полная вероятность отражения нейтральной частицы на катод

$$P(A/K_y) = \begin{cases} \frac{1}{4} \int_{\beta_0 - \beta_n}^{\beta_0 + \beta_n} \sin \frac{\theta}{2} d\theta & \text{при } (\beta_0 - \beta_n) \geq 0 \\ \frac{1}{4} \left( \int_0^{\beta_0 + \beta_n} \sin \frac{\theta}{2} d\theta - \int_{\beta_0 - \beta_n}^0 \sin \frac{\theta}{2} d\theta \right) & \text{при } (\beta_0 - \beta_n) < 0 \end{cases} \quad (82)$$

Энергия нейтральной частицы, отраженной на катод, определяется по формулам (34) и (46). Из уравнение (46), введя дополнительную переменную  $R$ , равную косинусу угла  $\theta$

$$\theta = \arccos \left( 1 - \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon_0 C_m} \right) = \arccos R. \quad (83)$$

Тогда, исходя из равенства вероятностей угла отражения и энергетического уровня нейтральной частицы

$$w_{\theta}(\theta)d\theta = w_{\varepsilon}(\varepsilon)d\varepsilon \quad (84)$$

распределение вероятности энергии

$$w_{\varepsilon}(\varepsilon) = w_{\theta}(\theta) \left| \frac{d\theta}{d\varepsilon} \right| = w_{\theta}(\theta) \cdot \left| \frac{d\theta}{dR} \cdot \frac{dR}{d\varepsilon} \right|. \quad (85)$$

Поскольку

$$\frac{d\theta}{dR} = -\frac{1}{\sqrt{1-R^2}} = -\frac{1}{\sqrt{1-\left(1-\frac{\varepsilon_0-\varepsilon}{\varepsilon_0 C_m}\right)^2}}, \quad (86)$$

$$\frac{dR}{d\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon_0 C_m}, \quad (87)$$

это с учетом двузначности обратной зависимости  $\varepsilon = \varepsilon(\theta)$  распределение вероятности энергетических уровней

$$w_{\varepsilon}(\varepsilon) = \frac{1}{2\sqrt{2\varepsilon_0 C_m(\varepsilon_0 - \varepsilon) - (\varepsilon_0 - \varepsilon)^2}} \cdot \left| \sin\left(\frac{1}{2} \arccos\left(1 - \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon_0 C_m}\right)\right) \right|. \quad (88)$$

Реальные процессы формирования ЭСПП могут в некоторой мере отличаться от изложенной выше модели. Согласно ей высшие энергетические равные формируются в основном за счет бесстолкновительного движения ионов к катоду. Однако возможно следует при определении плотности потока бесстолкновительного движения учитывать то обстоятельство, что сечение резонансной перезарядки по порядку величин самое большое, только при малых скоростях ионов сечение упругих столкновений уравнивается с ним, сечение ионизации приблизительно на порядок меньше сечения резонансной перезарядки. Это в свою очередь может привести к тому, что в начале своего движения к катоду ион имеет очень малую скорость и для него практически равновероятными есть как упругое столкновение, так и резонансная перезарядка. Ситуация с вероятностью бесстолкновительного движения рассмотрена выше. Но возможный в каждой конкретной ситуации вариант, когда заряд в результате непрерывных актов перезарядки просто передается от одной частицы к другой, причем каждый новый ион начинает движение к катоду с нулевой скорости. Этот эстафетный процесс без влияния на ЭСПП продолжается, пока ион не войдет в ближайшие к катоду слои ОКП, где как раз и будут сформированы наиболее существенные энергетические уровни. Подобные аргументы дополнительно обосновывают тезис о приемлемости допущения относительно определения уровня начальной энергии предпоследнего шага в траектории ионов. Учитывая, что вероятность бесстолкновительного движения ионов особенно в

значительных промежутках ОКП небольшая, модель формирования ЭСПП принята в изложенном выше варианте.

Приведенные выше зависимости составляют аналитическую основу программы для расчета ЭСПП в зависимости от параметров технологического процесса.

### 1.4.3. Энергетический спектр падающего потока

Энергия частиц, бомбардирующих металлическую поверхность в процессе ее модификации АТР, играет наиболее существенную роль в формировании поверхностного модифицированного слоя, поскольку, как отмечалось уже многократно, в любой термодинамической системе в первую очередь реализуются те процессы, которые в текущих условиях энергетически наиболее выгодны. Сопоставление ЭСПП с качественными и количественными характеристиками газовой среды может обеспечить формирование достоверной и реалистической энергетической модели процесса и прогнозирование результатов обработки.

Этот тезис безусловный и не отрицается ни в одной из известных моделей процесса [8, 10, 16-19]. Качественный состав падающего потока исследовался [10, 20], однако методика экспериментов, в сущности говоря, разрешала анализировать состав потока уже за пределами катода, что не всегда адекватно отображает

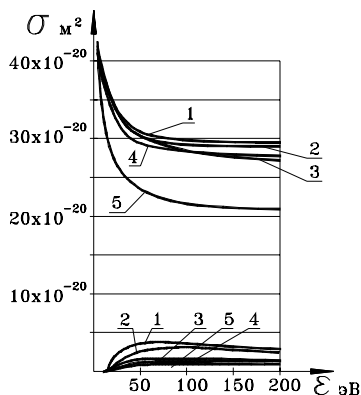


Рис. 1.59. Сечения резонансной перезарядки (верхние кривые) ударной ионизации (нижние)  
 1 – Ar, 2 –  $N_2$ , 3 –  $H_2$ , 4 – N,  
 5 – H

реальность. Например, пролетая через калиброванное отверстие в катоде, легкие частицы при одинаковой энергии имеют большую скорость, меньшее время пролета и меньшее отклонение в сторону стенок отверстия, которые являются катодом. Кроме того, тяжелые частицы, как правило, меньше отклоняются от траектории движения под влиянием поля и бомбардируют поверхность под большим углом к нормали, соответственно имеют большую вероятность встречи со стенками калиброванного отверстия. Таким образом, легкие частицы с большей

вероятностью могут пролететь отверстие и быть зафиксированными за катодом, что служит причиной некоторого искажения ЭСПП в пользу легких частиц, например, атомарных ионов компонентов. Кроме того, традиционно в исследованиях процессов азотирования в тлеющем разряде не учитывается роль нейтральных частиц, возникающих в результате резонансной перезарядки, вероятность ее даже больше, чем ионизации. Этот вывод подтверждает рис. 1.59, на котором сопоставлены сечения ионизации и резонансной перезарядки. По порядку величин максимальные значения сечений ионизации для аргона составляет  $4,5 \times 10^{-20} \text{ м}^2$ , для молекулярного азота  $3 \times 10^{-20} \text{ м}^2$ , а для других типичных компонентов газовой среды  $1 \times 10^{-20} \text{ м}^2$ . В то же время минимальные значения (в исследуемой области энергий) сечений резонансной перезарядки для атомарного водорода составляет  $20 \times 10^{-20} \text{ м}^2$ , для других компонентов – порядка  $30 \times 10^{-20} \text{ м}^2$ , т.е. в среднем сечение этого процесса, а, соответственно и вероятностные параметры, на порядок больше, чем для ионизации. Кроме того, характер влияния энергии иона на сечение резонансной перезарядки такой, что с уменьшением энергии (скорости) вероятность образования быстрой нейтральной частицы резко возрастает. При определенных условиях целиком вероятно, что этот подпроцесс становится превосходящим. Другими словами, при достаточной концентрации частиц в среде ион, образовавшийся в результате прямой или ступенчатой ионизации идвигающийся под действием поля сначала с небольшой скоростью, очень с большой вероятностью может перезарядиться с нейтральной частицей. Собственно говоря, речь идет как бы об эстафете заряда, передаваемого путем резонансной перезарядки от одной частицы к другой. В этой связи вообще можно предполагать, что вполне возможной моделью взаимодействия элементарных подпроцессов, имеющих место в ионизированной газовой среде, может быть непрерывный процесс передачи заряда от иона нейтральной частице в результате резонансной перезарядки. О роли нейтральных быстрых частиц (нейтралов) свидетельствуют также данные сопоставления ЭСПП нейтралов и потока ионов, сведенные в табл. 1.13, из которой можно сделать вывод о существенной роли нейтралов в потоке частиц, бомбардирующих поверхность. Уместно также повторно заметить касательно неточности часто употребляемой терминологии, прежде всего названия процесса - ионное, ионно-плазменное азотирование и т.п.. Хотя ионы и являются очень существенным компонентом падающего потока, тем не менее далеко не единственным, что и должно отображать название процесса. К этому следует также напомнить, что основоположники теории процесса с самого начала называли его

Glimmnitrierung - азотирование в тлеющем разряде. Нельзя не согласиться, что этот термин наиболее точно отвечает физической сущности процесса [17, 18].

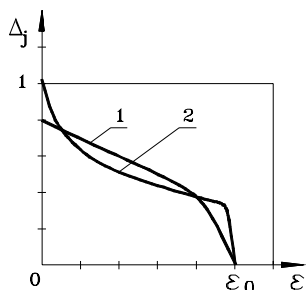
Таблица 1.13

**Соотношение расчетных значений плотности потоков нейтралов и ионов в зависимости от параметров режима ( $p$  – в торax)**

Смесь	Т, К	$j, A/m^2$	U=300 В			U=400 В			U=500 В		
			p=0,5	p=1	p=1,5	p=0,5	p=1	p=1,5	p=0,5	p=1	p=1,5
N75Ar25	673	5	0.285	0.687	1.219	0.090	0.268	1.107	0.174	0.429	1.037
		10	0.642	0.640	0.868	0.322	0.281	0.655	0.432	0.398	0.646
		15	0.687	0.621	0.912	0.397	0.282	0.802	0.440	0.401	0.729
	773	5	0.242	0.615	1.180	0.072	0.229	1.100	0.135	0.344	0.999
		10	0.577	0.584	0.805	0.290	0.223	0.597	0.375	0.355	0.599
		15	0.613	0.587	0.862	0.361	0.235	0.780	0.378	0.359	0.670
	873	5	0.197	0.523	1.100	0.067	0.179	1.050	0.120	0.307	0.230
		10	0.521	0.536	0.714	0.271	0.203	0.552	0.321	0.318	0.548
		15	0.545	0.523	0.787	0.323	0.221	0.748	0.335	0.327	0.625
N10Ar90	673	5	1.270	1.620	2.290	0.441	1.070	2.080	0.435	0.944	2.000
		10	1.420	1.610	1.920	0.600	0.863	1.480	0.582	0.819	1.310
		15	1.480	1.650	1.850	0.730	1.130	1.400	0.703	1.120	1.220
	773	5	1.160	1.660	2.290	0.374	0.894	1.910	0.373	0.851	1.940
		10	1.320	1.550	1.870	0.482	0.780	1.300	0.472	0.737	1.140
		15	1.380	1.690	1.680	0.646	1.050	1.220	0.622	1.040	1.040
	873	5	1.070	1.610	2.290	0.291	0.817	1.880	0.295	0.775	1.770
		10	1.170	1.510	1.740	0.428	0.715	1.180	0.420	0.619	1.020
		15	1.290	1.640	1.650	0.534	0.988	1.100	0.555	0.969	0.932
N90H10	673	5	0.272	0.736	1.310	0.113	0.271	1.230	0.202	0.472	1.100
		10	0.672	0.728	0.827	0.376	0.295	0.673	0.461	0.467	0.643
		15	0.695	0.687	0.872	0.432	0.286	0.837	0.431	0.434	0.711
	773	5	0.209	0.649	1.210	0.107	0.232	1.190	0.166	0.379	1.040
		10	0.589	0.604	0.725	0.351	0.241	0.619	0.405	0.382	0.589
		15	0.601	0.570	0.796	0.397	0.242	0.824	0.379	0.364	0.665
	873	5	0.184	0.536	1.160	0.100	0.112	1.160	0.150	0.337	0.989
		10	0.523	0.542	0.648	0.336	0.226	0.580	0.355	0.343	0.547
		15	0.522	0.509	0.738	0.354	0.230	0.797	0.340	0.325	0.635

Данные табл. 1.13 указывают на то, что характер влияния почти всех параметров режима на весомерность нейтралов в ЭСПП – с наличием экстремумов. Наиболее существенно влияет изменение давления, причем минимум соотношений плотностей составляющих потока приходится на величину давления в окрестности 0,8...1 тор, что неоднократно отмечалось и при исследованиях электрических характеристик разряда, кинетики движения электронов и связанных с этим ионизационных явлений. Увеличение содержания аргона в составе смеси приводит к росту соотношения плотностей потоков

вплоть до величин, когда поток нейтралов уравнивается или даже превышает поток заряженных частиц. Это объясняется не только тем, что аргон имеет сравнительно большее сечение резонансной перезарядки, но и существенно большей массой частиц аргона. Таким образом, при одинаковой энергии скорость движения ионов аргона в процессе их разгона полем будет меньшей, а, как вытекает из рис. 1.59, чем меньше скорость иона, тем больше вероятность резонансной перезарядки. Существенно также то, что энергетический спектр нейтралов занимает область низких энергий, где ионы практически отсутствуют (рис. 1.60). Предельная энергия нейтралов определенного сорта ограничивается значением  $\epsilon_0$ ,



*Рис. 1.60. Типовые распределения нейтралов по уровням энергий: 1-нейтралы столкновительного, 2-бесстолкновительного движений*

которое количественно соответствует изменению потенциала поля в пределах первого СБДН [21].

Концептуальной особенностью предлагаемой модели формирования ЭСПП есть введение понятия частицы с усредненными параметрами. Усреднение в первую очередь определяется значением СДСП частицы, которая движется в газе со скоростью, заметно отличной от скорости теплового движения. Принцип усреднения создает предпосылки для решения энергетической задачи, при этом учитываются реально возможные

флуктуации факторов влияния, исходя из их вероятности. Подобный подход правомерный, если вспомнить, что собственно образующий фактор всех подпроцессов - сечение - также усредненная вероятностная характеристика. Расчетная схема к определению энергетических характеристик нейтралов показана на рис. 1.61.

Ион к точке ОКП, где возможно событие резонансной перезарядки и координата которой  $y=0$ , движется, с учетом того, что речь идет об усредненной частице, под углом  $\beta_0$  к вектору поля (методика расчета угла изложена в [24]). Перед актом резонансной перезарядки ион может пройти путь, соответствующий перемещению в направлении вектора поля, от минимального  $y_{min}$  к максимальному  $y_0$ . Сообразно перемещению в поле изменяется и энергия иона, которую он получил от поля к моменту перезарядки,



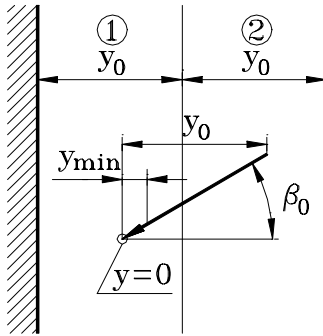


Рис. 1.61. Расчетная схема резонансной перезарядки

$$\varepsilon = 2U \left( \frac{y}{\delta} + \frac{y^2}{2\delta^2} \right). \quad (1)$$

Резонансная перезарядка имеет место по всей ширине ОКП, однако нейтралы, образованные в ее результате, имеют шансы долететь к катоду только из двух зон (ПБДН, рис. 1.61): 1 – вследствие бесстолкновительного движения, 2 – в результате отражения на катод после столкновения с частицей газа. Ширина каждого ПБДН равняется максимально

возможной координате  $y_0$ , которая рассчитывается как произведение СДСП на косинус угла  $\beta_0$ . Теоретическая модель достижения нейтралами катода изложена в [21].

Рассмотрим вероятностные предпосылки резонансной перезарядки. Пусть  $A$  – событие резонансной перезарядки частицы, находящейся в точке  $y=0$ , в результате взаимодействия с частицей, которая налетает, исходная координата которой  $y$ , причем эта координата – величина случайная и находится в интервале  $[0, y_0]$ . Плотность вероятности координаты частицы, которая налетает, подчиняется равномерному закону

$$w(y) = 1/y_0, \quad y \in [0, y_0] \quad (2)$$

Предполагается, что налетающая частица попадает в точку  $y=0$  без промежуточных столкновений. Условная вероятность бесстолкновительной возможности долететь частицей из точки  $y$  в точку  $0$

$$P(B/y) = 1 - \frac{y}{y_0}, \quad y \in [0, y_0], \quad (3)$$

где  $B$  – событие бесстолкновительного движения от точки  $y$  к точке  $y=0$ .

Энергия налетающей частицы является неслучайной функцией координаты ее старта  $\varepsilon = \varepsilon(y)$ , что позволяет при необходимости найти  $w(\varepsilon)$ , используя известное распределение  $w(y)$ , а также вероятность  $P(B/\varepsilon)$  на основе  $P(B/y)$ . Учитывая то, что сечение резонансной перезарядки  $\sigma_{pn} = \sigma(\varepsilon)$  известно (рис. 1.59), можно

выразить через него условную вероятность резонансной перезарядки  $P(A/\varepsilon, B)$  при общем выполнении в данном акте перезарядки условий нахождения стартующего иона на энергетическом уровне  $\varepsilon$  и его бесстолкновительного движения к месту встречи с мишенью (событие  $B$ ). Таким образом, следует определить  $w(\varepsilon/A)$  – условную плотность вероятности энергии частицы, которая стартует (закон распределения вероятности энергии) при условии осуществления акта резонансной перезарядки в результате ее встречи с частицей-мишенью.

Принимая во внимание очевидное равенство условных плотностей с учетом принятых прежде ограничений (3) (в случае реализации события  $A$  неизбежно имеет место событие  $B$ , таким образом условие  $A$  служит причиной комплекса условий  $A$  и  $B$ ),

$$w(\varepsilon / A) = w(\varepsilon / A, B), \quad (4)$$

после подстановки формулы Байеса

$$w(\varepsilon / A, B) = \frac{P(A / \varepsilon, B) \cdot w(\varepsilon / B)}{P(A / B)}. \quad (5)$$

На основе той же формулы плотность

$$w(\varepsilon / B) = \frac{P(B / \varepsilon) \cdot w(\varepsilon)}{P(B)} = \frac{P(B / \varepsilon) \cdot w(\varepsilon)}{\int_{\varepsilon} P(B / \varepsilon) \cdot w(\varepsilon) d\varepsilon} \quad (6)$$

При этом плотность  $w(\varepsilon)$  и условная вероятность  $P(B/\varepsilon)$  могут быть найдены на основании изложенного выше.

Практическая реализация изложенного алгоритма осуществляется с учетом следующих соображений. Поскольку событие резонансной перезарядки возможно только при обязательном выполнении события  $B$ , то

$$P(A, B / \varepsilon) = P(A / B, \varepsilon) \cdot P(B). \quad (7)$$

Вероятность  $P(A/B, \varepsilon)$  зависит от вероятностной характеристики, которым является сечение резонансной перезарядки

$$P(A / B, \varepsilon) = K_{P\sigma} \sigma(\varepsilon), \quad (8)$$

где  $K_{P\sigma}$  - некоторый коэффициент пропорциональности,

$$\sigma(\varepsilon) = a_{pn} (K_{VE} \sqrt{\varepsilon})^{-b_{pn}} \cdot 10^{-20}, \quad (9)$$

где  $a_{pn}$ ,  $b_{pn}$ ,  $K_{VE}$  – коэффициенты, установленные в [1].

Максимальная координата старта иона

$$y_0 = \frac{1}{C_P \rho \sigma_{vc}}, \quad (10)$$

где  $C_P$  – константа концентрации компонента,

$p$  – давление в камере,  
 $\sigma_{vc}$  – приведенное сечение столкновений иона исследуемого сорта с частицами газа.

Минимальная координата старта

$$y_{\min} = \sqrt[3]{1/n_w}, \quad (11)$$

где  $n_w$  – концентрация исследуемого компонента.

Учитывая, что координата связана с энергией выражением

$$y = \delta \frac{U - \sqrt{U^2 - U\varepsilon}}{U}, \quad (12)$$

где  $\delta$  – ширина ОКП,

$U$  – межэлектродный потенциал, вероятность события  $B$  определена

$$P(B) = 1 - \frac{\delta \left( U - \sqrt{U^2 - U\varepsilon} \right)}{U y_0}. \quad (13)$$

В каждой из зон (рис. 1.61) генерируется в результате резонансной перезарядки поток нейтралов

$$j_{vw} = 1,2 n_{+k} y_0 C_p p K_p \overline{V_+} \sigma_{pn}, \quad (14)$$

где  $n_{+k}$  – концентрация ионов исследуемого сорта возле катода,

$K_p$  – коэффициент объемного содержания компонента в смеси,

$\overline{V_+}$  – средняя скорость ионов в окрестности катода, (коэффициент 1,2 учитывает возможность резонансной перезарядки на «чужих» частицах).

Максимально возможная энергия, обусловленная (1), разбивается на определенное число дискретных уровней

$$z_E = \varepsilon_0 / \Delta_\varepsilon, \quad (15)$$

где  $\varepsilon_0$  – максимально возможная энергия, рассчитанная по (1) при  $y=y_0$ ,

$\Delta_\varepsilon$  – величина градаций энергетического спектра.

Тогда условная вероятность генерации нейтралов с определенной энергией в диапазоне  $(\varepsilon_i \dots \varepsilon_i + \Delta_\varepsilon)$  и средней энергией  $0,5(2\varepsilon_i + \Delta_\varepsilon)$

$$P(A, B / \varepsilon) = \frac{\int_{i \cdot \Delta_\varepsilon}^{(i+1) \cdot \Delta_\varepsilon} \sigma(\varepsilon) \left( 1 - \frac{\delta(U - \sqrt{U^2 - U\varepsilon})}{y_0 U} \right) d\varepsilon}{\int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_0} \sigma(\varepsilon) \left( 1 - \frac{\delta(U - \sqrt{U^2 - U\varepsilon})}{y_0 U} \right) d\varepsilon}, \quad (16)$$

где  $i$  – индекс энергетического уровня,

$\varepsilon_{\min}$  – минимально возможная энергия, обусловленная по (1) при  $y = y_{\min}$ . Коэффициент  $K_{P\sigma}$  в формуле (16) выносится за интеграл и сокращается.

Доля потока нейтралов с энергией в  $i$  – энергетическом уровне

$$\Delta_{ji} = P(A, B / \varepsilon) j_{vw} \quad (17)$$

На распределение по энергетическим уровням нейтралов, образованных в зоне 2 (рис. 1.61) и достигших катода после столкновения, влияет, кроме того, вероятность отражения непосредственно на катод и вероятность угла отражения [21]. Таким образом, алгоритм распределения по энергетическим уровням нейтралов столкновительного движения предусматривает:

- определение условной вероятности отражения нейтралов на катод  $P(A/K_y)_i$  [21, (82)], где  $A$  – событие достижения нейтралом катода,  $K_{yzi}$  – относительная координата столкновения в ПБДН,  $K_{yzi} = (i + 0.5)/z$ ;

- сумму условных вероятностей, необходимую для последующего нормирования всех вероятностей на единицу

$$S_{PAKy} = \sum_0^{z_E - 1} P(A/K_y) ; \quad (18)$$

- нормирование условных вероятностей на единицу

$$P(A/K_y)_{vi} = \frac{P(A/K_y)_i}{S_{PAKy}} ; \quad (19)$$

- сток (дебет) каждого ПБДН

$$\Delta_{jci} = P(A/K_y)_{vi} j_{vw} ; \quad (20)$$

- распределение стока по энергетическим уровням в зависимости от угла отражения, при этом энергия отраженного нейтрала может изменяться в диапазоне от  $\varepsilon_{\beta n}$  [21, (46)] до  $\varepsilon_0$ , а вероятность наличия отраженного нейтрала с определенной энергией

$$P_{\varepsilon}(\varepsilon)_{i\beta} = w_{\varepsilon}(\varepsilon)_{i\beta} \cdot \Delta_{\varepsilon}, \quad (21)$$

где  $w_{\varepsilon}(\varepsilon)_{i\beta}$  - распределение вероятностей энергии по условию потерь при отражении нейтрала [21, (88)],

$i\beta$  - индекс энергетического уровня в спектре энергий нейтралов после отражения;

- число нейтралов определенного энергетического уровня с учетом угла отражения

$$\Delta_{j\beta} = \sum_1^{z_{E\beta}} P_{\varepsilon}(\varepsilon)_{i\beta} \cdot \Delta_{j\beta i}. \quad (22)$$

Модель расчета ЭСПП методологически построена по принципу последнего анализа элементарных подпроцессов в ОКП со последующей дифференциацией частиц по энергетическим уровням. Аналитическое обеспечение программы расчет выполнено в [1, 14, 21]. Учитывались следующие элементарные подпроцессы, имеющие место в условиях ТЭРГ:

- вторичная ионно-электронная эмиссия;
- термоэлектронная эмиссия;
- прямая ионизация молекул и атомов электронным ударом;
- ступенчатая ионизация молекул и атомов;
- диссоциация молекул электронным ударом;
- упругие столкновения частиц газа;
- резонансная перезарядка.

Не учитывалась через несущественное влияние диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов (по порядку величин сечение ионизации электронным ударом  $10^{-20}$  м<sup>2</sup>, диссоциативной рекомбинации -  $10^{-27}$ - $10^{-32}$  м<sup>2</sup> [1]). В качестве исходных данных принимались состав газовой среды, напряжение разряда  $U$ ,  $V$ , давление в разрядной камере  $p$ , тор, плотность тока разряда  $j$ , А/м<sup>2</sup>, температура газового компонента  $T$ , °К.

Вся ширина области катодного падения разбивалась на определенное количество слоев, в каждом из которых последовательно выполнялись расчеты характеристик элементарных подпроцессов. Количество слоев выбиралось в результате анализа влияния его на точность расчетов (контроль по данным изменения суммарного потока ионов в зависимости от числа слоев). Влияние количества слоев на величину суммарного потока представлено на рис. 1.62. (сумма потоков умножена на  $10^{-19}$ , числовые пометки возле точек графика указывают в числителе – на количество слоев, знаменателе – отношение суммы потоков к такой же сумме, рассчитанной при числе слоев 4000). Исходя из рис. 1.62, принято

число слоев  $z_c=200$ , при котором обеспечивается достаточная точность и сравнительно приемлемое время расчета, хотя в принципе возможен выбор любого количества слоев.

Блоки расчета ЭСПП компонентов из рис. 4 имеют одинаковую структуру, которая показана на рис. 6.

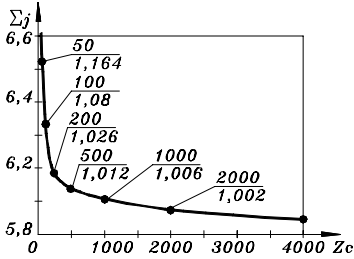


Рис. 1.62. К выбору оптимального числа слоев ОКП

Дополнительно к [8-10] возникла необходимость уточнения некоторых положений. Вопросом вторичной эмиссии посвящен ряд фундаментальных работ, среди которых [22, 23]. В результате их анализа относительно реально возможных в рассмотренных технологиях энергетических уровней получена формула для определения коэффициента вторичной ионно-электронной эмиссии

$$\gamma = 0,1 + 1,6 \cdot 10^{-5} K_{VE+} \sqrt{\varepsilon}, \quad (23)$$

где  $K_{VE+}$  – коэффициент для расчета скорости иона [9],

$\varepsilon$  – энергия частицы, бомбардирующая поверхность, принята энергия, полученная ионом в результате бесстолкновительного движения через ПСП, ширина ее равняется средней длине свободного пробега иона в конкретной газовой среде.

Необходимость расчета ЭСПП в более широком диапазоне параметров технологического режима требует, в отличие от полученной в [10] линейной зависимости, применение уточненной формулы для эталонной ширины ОКП (в качестве эталонной принята ширина ОКП для смеси, содержащей 100% азота, при температуре  $T=300^\circ\text{K}$ )

$$d_{N_2,300} = 1,54 p^{-0.89} + 1,84 p^{0.58} j^{-(1,04 p^{-0.39})} \quad (24)$$

Дальнейшая обработка результата с целью получения ширины ОКП в конкретных условиях - аналогична [1], равно как и методика определения ширины.

Конечные результаты расчета в виде относительного ЭСПП ионов и нейтралов (отношение частиц с энергией в определенном диапазоне к общему количеству ионов) более удобны для использования, чем в варианте количественного спектра, поскольку разрешают сравнивать при произвольной плотности тока (собственно говоря это ток ионов) потоки заряженных и

нейтральных частиц. Но значение относительного ЭСПП зависит и от числа слоев, на которые в ходе расчета разбита ширина ОКП, поэтому энергетический спектр в абсолютных единицах частиц может быть рассчитан, если учесть, что значение относительного ЭСПП получены, как

$$j_{\varepsilon v} = j_{\varepsilon} / j_{+}, \quad (25)$$

где  $j_{\varepsilon}$  - значение ЭСПП в абсолютных единицах (номинальный ЭСПП),

$j_{+}$  - плотность потока ионов, определяемая через плотность тока разряда  $j_{+} = j / q_e = j / 1,6022 \cdot 10^{-19} = 0,624 \cdot 10^{19} j$ . Тогда значение номинального ЭСПП

$$j_{\varepsilon} = 0,624 \cdot 10^{19} j \cdot j_{\varepsilon v} \quad (26)$$

Диапазон энергий, которому отвечает определенное значение как относительного, так и номинального ЭСПП, определяется через градацию ЭСПП

$$\Delta_{\varepsilon} = U / z_c \quad (27)$$

В дополнение к прежде полученным формулам [1] для расчета скорости электронов, где предполагалась с целью ускорения вычислений разбивка ОКП на 50 слоев, в программе количество слоев  $z_c$  может быть произвольной. Однако это обстоятельство должна быть обязательно учтено, так как все коэффициенты в уравнениях скорости электронов определяются только для 50-слойной разбивки. С целью исключения ошибки в программе предусмотрена процедура пересчета текущего номера слоя в шкалу с количеством слоев  $z_c = 50$ . По этой причине формула для определения скорости электронов приобретает вид

$$\bar{V}_e(z) = V_{e0} + a_v i \frac{50}{z_c} \cdot e^{-b_v i \frac{50}{z_c}} \cdot 10^6, \quad (28)$$

где  $V_{e0}$  – начальная скорость вылета электронов из катода,

$a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты, зависящие от условий разряда,

$i$  – номер текущего слоя, для которого выполняются расчеты параметров подпроцесса.

С целью получения аналитических зависимостей сечений ступенчатой ионизации атомарных компонентов выполнен анализ данных, приведенных в [2, 24]. В результате стало возможным аппроксимировать сечение в диапазоне от энергии возбуждения верхних уровней до энергии ионизации линейной зависимостью

$$\sigma_{ic} = K_{\sigma v} (V_i - V_a), \quad V_i \geq V_a, \quad (29)$$

где  $K_{\sigma v}$  – коэффициент крутизны зависимости, для атомарного

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
азота  $K_{\sigma V} = 0,948 \cdot 10^{-26}$  м·с, для атомарного водорода  $K_{\sigma V} = 1,065 \cdot 10^{-26}$  м·с,

$V_i$  - скорость электронов в  $i$ - слое,

$V_g$  - скорость электронов, соответствующая энергии возбуждения верхних уровней, для атомарного азота  $V_g = 1,906 \cdot 10^6$  м/с, для атомарного водорода  $V_g = 1,894 \cdot 10^6$  м/с.

Следует заметить, что теоретическое обеспечение программы предусматривает ее применение только в диапазоне значений исходных параметров технологического режима, соответствующих реальным. Вместе с тем методология, заложенная в теорию, принципиально разрешает расширить границы применения в случае возникновения такой потребности, однако для этого потребуется некоторое дополнительное уточнение аналитики, например, зависимостей для аналитического определения сечений подпроцессов и т.п..

Практическое применение программного обеспечения для формирования ЭСПП позволяет выполнить расчет энергетического спектра для одного варианту комбинации параметров режима приблизительно за одну минуту (процессор Athlon-2500).

Как уже отмечалось выше, методология программного обеспечения для расчета ЭСПП частиц, бомбардирующих металлическую поверхность в процессе АТР, заключается в разбивке ОКП на определенное число слоев и определении характеристик элементарных подпроцессов, реально имеющих место в них. Для каждого слоя рассчитываются прирост количества ионов каждого из компонентов ионизированной газовой среды, возникающих в результате прямой и ступенчатой ионизации электронным ударом, суммарный поток ионов, вероятность столкновений ионов с другими частицами газа, вероятность бесстолкновительного движения ионов к катоду и на ее основе - сток ионов на катод из рассмотренного слоя и их энергетическая идентификация, количество нейтральных частиц (нейтралов), возникших в результате резонансной перезарядки и движущихся по инерции к катоду с энергией, соответствующей энергии первичного иона в момент перезарядки или последнего столкновения нейтральной и заряженной частиц газа. Полученные данные кинетики образования заряженных частиц качественно отвечают данным, известным из физики электрического разряда в газе [13, 15, 16]. Типичные графики изменения скорости электронов и прироста ионов по ширине ОКП показаны на рис. 1.63 (по горизонтали - отношение координаты слоя к ширине ОКП). Из рис. 1.63 следует, что с ростом скорости электронов как инициаторов прямой и ступенчатой ионизации интенсивно нарастает генерация



ионов, причем отслеживаются особенности зависимостей сечения ионизации от скорости (энергии) электронов для разных компонентов.

При приблизительно одинаковом потенциале ионизации

сечение для аргона увеличивается с ростом энергии инициатора более интенсивно, по этой причине прирост ионов аргона начинается раньше. Но поскольку графики соответствуют газовой среде с преимуществом азота (75%), то интенсивность генерации ионов аргона ниже.

Типичная форма распределения ионов по энергетическим уровням для разных компонентов показана на рис. 1.64, где по вертикали фиксировалось относительное распределение ионов по энергетическим уровням (отношение количества ионов в данном диапазоне энергий к общему числу ионов), а по горизонтали - энергия ионов в электрон-вольтах. Максимальная энергия ионов ограничивается значением энергии, которую ион получит от поля в случае, если пролетит без столкновений ПСП, непосредственно примыкающую к катоду. Эта энергия рассчитывается

$$\varepsilon_1 = 2Uq_e \left( \frac{\bar{l}}{\delta} - \frac{(\bar{l})^2}{2\delta^2} \right), \quad (30)$$

где  $q_e$  - элементарный заряд,

$\bar{l}$  - средняя длина свободного пробега иона,

$\delta$  - ширина ОКП.

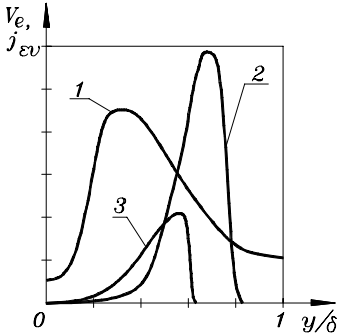


Рис. 1.63. Изменение скорости электронов и прироста ионов по ширине ОКП, среда N75Ar25,  $U=500$  В,  $p=1$  тор,  $j=5$  А/м<sup>2</sup>,  $T=773$  К

1 - скорость электронов, 2- прирост числа ионов N<sub>2</sub>, 3 - то же, аргона

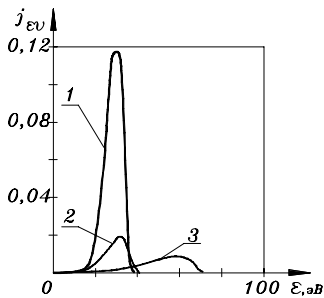
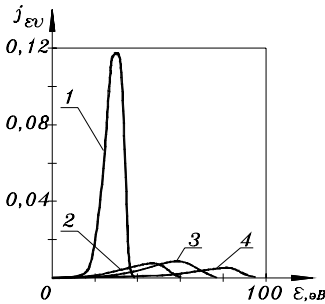
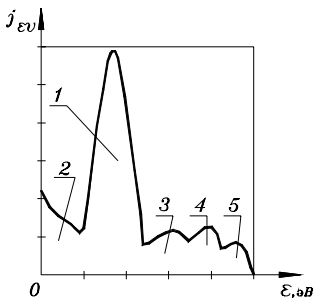


Рис. 1.64. Относительное распределение ионов по энергетическим уровням, среда N75Ar25,  $U=500$  В,  $p=1$  тор,  $j=5$  А/м<sup>2</sup>,  $T=773$  К  
1 - N<sub>2</sub>, 2- Ar, 3 - N

Поскольку СДСП зависит кроме других характеристик и от приведенного сечения столкновений иона с частицами газа, а они в основном определяются размерами частиц и ионов, на рис. 1.64 предельная энергия для атомарного азота существенным образом



*Рис. 1.65. Относительное распределение ионов по энергиям, среда N 90Н10, U=400 В, p=1 тор, j=5 А/м<sup>2</sup>, T=773°К, 1 N<sub>2</sub>, 2- H<sub>2</sub>, 3 – N, 4 – Н*



*Рис. 1.66. Типовая структура ЭСПП при АТР, зоны:*

*1 – основных молекулярных и «тяжелых» атомарных ионов, 2 – нейтралов, 3 – «легких» молекулярных ионов, 4 – основных атомарных ионов, 5 – «легких» атомарных ионов*

больше, чем для молекулярных азота или аргона.

Еще более наглядно этот тезис подтверждается для газовых сред, включающих водород, масса и размеры которого существенным образом меньше в сравнении с азотом и аргоном (рис. 1.65). Следует также иметь в виду, что как сама ширина ОКП, так и отдельные ее составляющие зависят от параметров режима. Например, чем меньше давление при той же плотности тока, тем больше ширина ОКП. Уменьшение давления, т.е. числа частиц, приводит к уменьшению плотности тока, увеличивающей по экспоненте ширину ОКП. Это объясняется тем, что с уменьшением числа контрактиц снижается вероятность столкновений электронов с ними, т.е. интенсивность ионизационных процессов, уменьшается плотность тока, а так как отдельные фазы движения электронов через ОКП увеличиваются в пространстве, то увеличивается общая ширина ОКП. Аналогично влияет повышение температуры при одинаковом давлении, что также адекватно уменьшению числа частиц.

В общем случае суммарное относительное распределение частиц по энергетическим уровням имеет четко заметные

зоны, которые демонстрируются рис. 1.66.

Качественно аналогичная структура относительного ЭСПП была получена в исследованиях по разрушению первой стенки термоядерных реакторов под влиянием потоков заряженных и нейтральных частиц [25].

Аналитическое описание ЭСПП необходимо для последующего анализа взаимодействия падающего потока с металлической поверхностью. Его удобнее всего выполнить сначала по отдельным компонентам, а потом суммируя составляющие ЭСПП. Установлено, что лучшего соответствия аналитических зависимостей и расчетного материала можно достичь, применяя выражения, в основе которых бета-распределение

$$j_{ev} = K_{dj} \cdot \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)+\Gamma(b)} \varepsilon_V^{(a-1)} (1-\varepsilon_V)^{(b-1)}, \quad (31)$$

где  $j_{ev}$  – относительное распределение частиц (число частиц, обладающих энергией в диапазоне  $\varepsilon_i - \varepsilon_i + \Delta\varepsilon$ , отнесенное к общему числу ионов;

$K_{dj}$  – коэффициент, который устанавливает в основном величину экстремального значения распределения;

$\Gamma$  – гамма-функция вида

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt; \quad (32)$$

$a, b$  – коэффициенты, которые устанавливают в основном форму распределения,  $a, b > 0$ ;

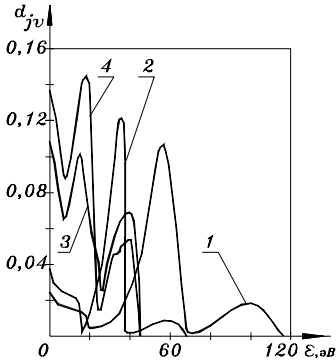
$\varepsilon_V$  – относительный энергетический уровень

$$\varepsilon_V = \varepsilon_i / \varepsilon_1, \quad 0 < \varepsilon_V < 1. \quad (33)$$

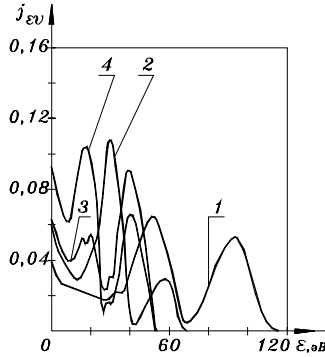
Для качественного анализа влияния параметров технологического режима на ЭСПП ниже приведенные примеры энергетических спектров (рис. 1.67-1.69), из которых следует, что при увеличении напряжения разряда и небольшом давлении спектр сдвигается в сторону более высоких энергетических уровней. Однако в случае сравнительно больших давлений этот сдвиг менее заметен. Связано это с тем, что при определении СДСП (а от нее зависит и предельный энергетический уровень) решающую роль играет давление. С увеличением давления СДСП уменьшается. Но энергетический уровень, как функция потенциала поля в конце ПСП, линейно зависит от межэлектродного потенциала, тогда как СДСП влияет на значение максимума энергии по показательной функции. Таким образом, при определенном давлении влияние обоих параметров взаимно компенсируется.

Изменение температуры от 673°К до 873°К увеличивает

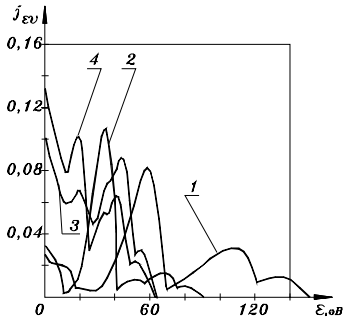
максимальный энергетический уровень (сдвигает спектры в сторону больше высоких энергий приблизительно на 8...10%), снижает пики низких энергий и аналогично повышает пики средних. В водневомистых средах заметно снижаются пики средних энергий (в 1,25...1,5 раза) и прибавляется зона высоких энергий, обусловленная наличием в спектре энергий атомарного водорода (рис. 14).



*Рис. 1.67. ЭСПП для N75Ar25,  $j = 5 \text{ A/m}^2$ ,  $T = 773 \text{ K}$   
1 –  $U = 500 \text{ В}$ ,  $p = 0,5 \text{ тора}$ ; 2 –  $U = 200 \text{ В}$ ,  $p = 0,5 \text{ тора}$ ; 3 –  $U = 500 \text{ В}$ ,  $p = 1,5 \text{ тора}$ ; 4 –  $U = 300 \text{ В}$ ,  $p = 1,5 \text{ тора}$*



*Рис. 1.68. ЭСПП для N75Ar25,  $j = 15 \text{ A/m}^2$ ,  $T = 773 \text{ K}$   
1 –  $U = 500 \text{ В}$ ,  $p = 0,5 \text{ тора}$ ; 2 –  $U = 200 \text{ В}$ ,  $p = 0,5 \text{ тора}$ ; 3 –  $U = 500 \text{ В}$ ,  $p = 1,5 \text{ тора}$ ; 4 –  $U = 300 \text{ В}$ ,  $p = 1,5 \text{ тора}$*



*Рис. 1.67. ЭСПП для N90H10,  $j = 5 \text{ A/m}^2$ ,  $T = 773 \text{ K}$   
1 –  $U = 500 \text{ В}$ ,  $p = 0,5 \text{ тора}$ ; 2 –  $U = 200 \text{ В}$ ,  $p = 0,5 \text{ тора}$ ; 3 –  $U = 500 \text{ В}$ ,  $p = 1,5 \text{ тора}$ ; 4 –  $U = 300 \text{ В}$ ,  $p = 1,5 \text{ тора}$*

Приведенные примеры ЭСПП указывают на наличие широких возможностей для изменения энергии падающего потока. Это, в свою очередь, открывает путь к управлению конечными результатами АТР, поскольку, подбирая спектр энергетического влияния падающего потока на металлическую поверхность, можно получить разные фазовые структуры модифицируемых объектов в зависимости от требований последующей эксплуатации. Например, формируя

высокоэнергетический ЭСПП, можно ускорить процессы распыления поверхности. Это приведет к снижению интенсивности формирования нитридов, в результате будет получена структура, в которой преобладает зона внутреннего азотирования.

Следует заметить, что на характер взаимодействия газовой среды с поверхностью влияет не только абсолютные значения энергии, но и угловое распределение сил, с которыми ЭСПП влияет на поверхность. С этой точки зрения именно комбинация обоих факторов наиболее точно будет отображать энергетику модификации поверхности с помощью ВДГРТ.

### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Пастух І. М. Реальні газорозрядні процеси вакуумно-дифузійних технологій модифікації поверхні металів. – Хмельницький: Вісник ТУП;- 2003;- №1; С. 95-106.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992. – 535 с.
3. Мирдель Г. Электрофизика/ Пер. с нем. по ред. В.И. Раховского. – М.: Мир, 1972. – С. 180-200.
4. Пастух І. М. Процеси вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій модифікації поверхні металевих сплавів. – Хмельницький: Вісник ТУП;- 2000;- №6; С. 124-135.
5. Пастух І. М. Методика обробки даних багатofакторних моделей. – Хмельницький: Вісник ТУП;- 2002;- №6; С. 42-46.
6. Жиглинский А. Г., Кучинский В. В. Массоперенос при взаимодействии плазмы с поверхностью. – М.: Энергоатомиздат, 1991, - 206 с.
7. Лахтин Ю. М. Диффузионные основы процесса азотирования. – Металловедение и термическая обработка металлов,- 1995, №7, с. 14-17.
8. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Азотирование стали. М., Машиностроение, 1976, 256 с.
9. Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка сплавов в активизированных газовых средах. Вестник машиностроения, 1986, №9. С. 49-53.
10. Арзамасов Б. Н., Братухин А. Г., Елисеев Ю. С., Панайоти Т. А. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: Из-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 1999. 400 с.
11. Пастух І. М., Давидов А. М., Здибель О. С. Електричні параметри вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій модифікації поверхні металів. – Хмельницький: Вісник ТУП;- 2002;- №5; С. 170-175.
12. Бёрд Г. Молекулярная газовая динамика. М.: Мир, 1981. –

13. Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов. – М.: Наука, 1980. –416 с.
14. Пастух І. М. Кінетика прикатодних процесів як фактор формування енергетичного спектру падаючого потоку. – Хмельницький: Вісник ТУП;- 2004;- №1;ч. 1 С. 53-64.
15. Каганов И. Л. Ионные приборы. М.: Энергия, 1972, 517 с.
16. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Шпис Г.-Й., Бемер З. Теория и технология азотирования. М.: Металлургия. 1991. 320 с.
17. Kolbel J. Die Nitridschichtbildung bei der Glimmnitrierung, Forsch. Ber. d. Land. NRW Nr 1555, (1965)
18. Keller K. Schichtaufbau glimmnitrierten Eisenwerkstoffe // Harterei Technische Mitteilung. 1971. Bd. 26, №2. S. 120-128.
19. Edenhofer V. Bewley T. J. Heat Treatment, 1976, Metal Soc., London, 7-13 (1978)
20. Михайлов И. А. Ионные соотношения при разрядном азотировании// МиТОМ. 1965, №10, С. 50-51.
21. Пастух І. М. Теоретичні положення енергетичного спектру падаючого потоку в газорозрядних дифузійних технологіях. – Хмельницький: Вісник ТУП;- 2004;- №5; С. 19-35.
22. Бронштейн И. М., Фрайерман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. – М.: Наука. 1969, 395 с.
23. Брусиловский Б. А. Кинетическая ионно-электронная эмиссия. – М.: Энергоатомиздат. – 1990, 183 с.
24. Смирнов Б. М. Физика слабоионизированного газа. М.: Наука, 1978, с. 416.
25. Жиглинский А. Г., Кучинский В. В. Массоперенос при взаимодействии плазмы с поверхностью. – М.: Энергоатомиздат, 1991.- 205 с

## 1.5 Процессы на границе газ-поверхность

### 1.5.1. Взаимодействие падающего потока и поверхности

Как уже отмечалось в предыдущих разделах [1,2], падающий на катод поток (катод - обрабатываемые детали) в общем виде состоит из потоков нейтральных частиц и ионов. И те, и другие могут достигать катода как с предыдущими столкновениями, так и без них. Теоретические положения расчета энергетических спектров полного потока и его составляющих изложены в предыдущем разделе, причем дифференциация частиц на нейтральные и заряженные связана с тем, что энергетические спектры ионов и нейтралов существенно отличаются как по форме так, соответственно, и по их аналитической интерпретацией. Тем не менее характер взаимодействия потока частиц с металлической поверхностью, как это вытекает, например, из исследований относительно распыления поверхности, ионно-электронной эмиссии [4,5], зависит не только от величины энергии частицы, но и от того под каким углом она входит у столкновение с поверхностью и насколько столкновение отличается от условий центрального удара. Кроме того, падающий поток состоит из частиц разных компонентов газовой среды, а металлическая поверхность, как правило, включает несколько видов химических элементов. По названным причинам модель взаимодействия падающего потока с металлической поверхностью должна учитывать следующие моменты:

- вероятности угла встречи частицы с поверхностью и прицельного параметра столкновения частицы потока с частицей поверхности;

- энергетический спектр бомбардирующих частиц;

- вероятность столкновения с частицами поверхности определенного сорта в зависимости от химического состава металла;

- вероятность столкновения с частицами определенного компонента газовой среды, которые адсорбированы поверхностью;

- энергетические и ситуационные предпосылки для определенной образующей способности бомбардирующих частиц как результат их столкновения с элементами поверхности;

- вероятностные характеристики энергетического обмена в процессе столкновения.

Для обеспечения возможности использования ЭСПП с целью решения задач взаимодействия его с металлической поверхностью

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
 необходимо сформировать аналитическую модель ЭСПП. На первый взгляд простейшим было бы использовать для этого результаты непосредственного расчета ЭСПП, тем не менее, в таком случае решения практических инженерных задач значительно усложнилось бы, так как даже при использовании мощных средств для расчета спектра требуется значительное время (ПК с процессором Athlon-2500 для получения одного спектра работает возле 15 минут). Поэтому рассмотрим возможные варианты формирования аналитической модели ЭСПП, пригодном для инженерной практики.

Анализ распределений относительных (относительно полного потока ионов, который на 99,7% [6,7] соответствует плотности тока) потоков ионных составляющих полного ЭСПП указывает на возможность их аналитической интерпретации с использованием  $\beta$ -распределения, которое в общей форме имеет вид

$$j_{\varepsilon_{Vi}} = K_{dj} \cdot d_{\beta} \left( \frac{iU}{z_c \varepsilon_1} \right) \cdot j_{vM}, \quad (1)$$

где  $j_{\varepsilon_{Vi}}$  – относительное распределение частиц (отношение числа частиц, обладающих энергией в диапазоне  $\varepsilon_i - \varepsilon_i + \Delta\varepsilon$ , к общему числу ионов, определяемое через плотность тока  $j$  и элементарный заряд  $q_e$

$$j_{+} = j/q_e = j/1,6022 \cdot 10^{-19} = 0,624 \cdot 10^{19} j; \quad (2)$$

$d_{\beta} (i/z_c \varepsilon_1) - \beta$  – распределение от переменной текущего относительного энергетического уровня  $\varepsilon_{Vi}$

$$\varepsilon_{Vi} = \frac{iU}{z_c \varepsilon_1} = \varepsilon_i / \varepsilon_1, \quad 0 < \varepsilon_{Vi} < 1, \quad (3)$$

$\varepsilon_1$  – максимальный энергетический уровень первой от катода ПСП, ширина которой равняется СДСП  $\bar{l}$ ,

$$\varepsilon_1 = 2Uq_e \left( \frac{\bar{l}}{\delta} - \frac{(\bar{l})^2}{2\delta^2} \right), \quad (4)$$

$\delta$  - ширина области катодного падения (ОКП);

$$d_{\beta}(\varepsilon_{Vi}) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)+\Gamma(b)} \varepsilon_{Vi}^{(a-1)} (1-\varepsilon_{Vi})^{(b-1)} \quad (5)$$

$K_{dj}$  – коэффициент, который корректирует величину максимального значения распределения, поскольку она несколько изменяется в зависимости от комбинации коэффициентов  $a, b$ ;

$\Gamma$  – гамма-функция вида



$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{(x-1)} e^{-t} dt; \quad (6)$$

$a, b$  – коэффициенты, устанавливающие в основном форму распределения,  $a, b > 0$ ;

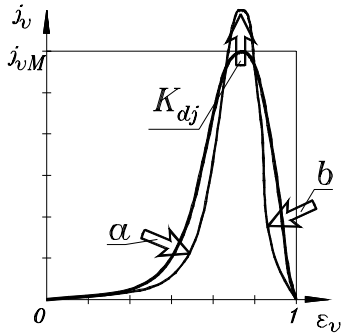


Рис. 1.70. Типовая форма распределения приведенного ЭСПП ионов (стрелками указано на характер изменений при увеличении коэффициентов)

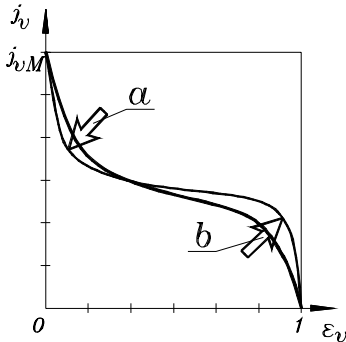


Рис. 1.70. Типовая форма распределения приведенного ЭСПП нейтралов (стрелками указано на характер изменений при увеличении коэффициентов)

$j_v$  – максимальное значение относительного распределения,

$z_c$  – количество энергетических уровней, на которые разбит энергетический спектр.

Наиболее существенным положительным свойством  $\beta$ -распределения есть возможность с помощью только двух коэффициентов широко варьировать его формой [8]. Типичные формы относительного распределения энергетического спектру ионов и факторы влияния на  $\beta$ -распределение показаны рис. 1.72, для нейтралов - рис. 1.73.

Подбор коэффициентов, которые входят у формулы (1) и (5), могут выполняться с помощью программного модуля в следующем порядке:

- присвоение начальных значений коэффициентам  $a, b, K_{dj}$  и интервала итерации;

- определение индекса энергетического спектра  $i_M$ , который отвечает экстремуму распределения  $\epsilon_i = \epsilon_{vM}$ ;

- определение коэффициента  $K_{dj}$  по условию равенства экстремальных значений действительного и аппроксимированного

распределений при текущей комбинации коэффициентов  $a$ ,  $b$ ;

- выбор оптимального значения коэффициента  $a$  путем постепенного его увеличения на величину интервала итерации с повторным корректирование коэффициента  $K_{dj}$  и проверкой на минимум суммы квадратов отклонений

$$\sum_{i=1}^{i_M} \sqrt{(j_{vi} - j_{vM} \cdot d_{\beta}(\varepsilon_v) \cdot K_{dj})^2} \rightarrow \min ; \quad (7)$$

- фиксация оптимального значения коэффициента  $a$  как начального;

- выбор оптимального значения коэффициента  $b$  аналогично выше указанной процедуре оптимизации коэффициента  $a$ ;

- фиксация оптимального значения коэффициента  $b$  как начального;

- повторение циклов подбора коэффициентов  $a$ ,  $b$  заданное число раз (установлено, что при величине итерации 0,01 число циклов последовательного выбора коэффициентов  $a$ ,  $b$  больше шести практически не влияет на точность конечного результата);

- формирование таблицы конечных результатов.

Эта таблица формируется по колонкам блоками значений  $a$ ,  $b$ ,  $K_{dj}$ ,  $jv$  последовательно для всех типов ионов, которые могут иметь место в конкретной газовой среде; по строкам – в зависимости от выбранных градаций давления.

Дальше таблицы коэффициентов могут использоваться двумя методами: непосредственного выбора табличных данных или созданием аппроксимационной модели определения коэффициентов. Метод непосредственного выбора табличных данных сводится к слиянию всех таблиц в одну базу данных, а дальше к программному определению индексов строк и колонок в зависимости от параметров технологического режима и типа ионов. Несмотря на простоту этого метода, он имеет ряд недостатков. Первый среди них - громоздкость базы начальных данных, например, при количестве градаций температуры, плотности тока и напряжения по три, а давления - шести, при трех ионных компонентах падающего потока (в азотно-водородных средах таких компонентов - четыре) база начальных данных состоит почти из 2000 элементов. Подобная база данных не может существовать автономно, а должна каждый раз высчитываться путем слияния таблиц-основ.

Вторым недостатком является то, что параметры технологического режима строго фиксированы, т.е. ЭСПИ можно смоделировать только для тех комбинаций температуры, плотности

тока, напряжения и давления, которые использовались в основном расчете. В некоторой мере последний недостаток можно нейтрализовать путем введения процедуры интерполяции значений коэффициентов между двумя соседними комбинациями технологических параметров, более близкими к исследуемым.

Метод аппроксимационной модели заключается в обработке таблиц-основ с целью установления зависимостей между элементами многофакторной системы данных. Эта обработка ведется на основе принципов, изложенных в [9,10]. Предыдущим анализом установлено, что данные из таблиц-основ для молекулярных ионов азота в зависимости от давления могут аппроксимироваться: коэффициент  $a$  и максимальное значение приведенного распределения  $j\nu$  – полиномами второй степени, коэффициент  $K_{dj}$  – линейной зависимостью. Оказалось также, что отношение  $a/b$  изменяется по линейному закону при изменении давления  $p$ , а это открывает путь для упрощения дальнейшего использования модели. Относительно атомарных ионов азота и аргона, то для них полином второй степени используется только относительно максимального значения приведенного распределения, для других коэффициентов возможно применение линейной зависимости. Тогда аппроксимационная модель для ионных компонентов молекулярного азота будет иметь вид:

$$a = K_{ap1} + K_{ap2} p + K_{ap3} p^2 \quad (8)$$

$$a/b = K_{abp1} + K_{abp2} p \quad (9)$$

$$K_{dj} = K_{Kp1} + K_{Kp2} p \quad (10)$$

$$j_{\nu M} = K_{Mp1} + K_{Mp2} p + K_{Mp3} p^2 \quad (11)$$

Влияние температуры, плотности тока и напряжения моделируются полиномами второй степени, поэтому коэффициенты, которые входят в уравнения (8)...(11) формируются по общему принципу

$$K_{ABm} = K_{Adm1} + K_{Adm2} d + K_{Adm3} d^2 \quad , \quad (12)$$

где  $A$  – обозначение индекса начального фактора (например, параметров  $a$ ,  $a/b$ ,  $K_{dj}$ ,  $j\nu$ ),

$B$  – обозначение индекса предыдущего фактора влияния,

$d$  – обозначение индекса следующего фактора влияния,

$m$  – номер индекса предыдущего фактора.

Согласно предложенной с целью упрощения дальнейшего изложения системой обозначений (12) коэффициенты в формулах (8)...(11) определяются:

$$K_{ap1} = K_{aj11} + K_{aj12} j + K_{aj13} j^2 \quad (13)$$

$$K_{ap2} = K_{aj21} + K_{aj22} j + K_{aj23} j^2 \quad (14)$$

$$K_{ap3} = K_{aj31} + K_{aj32} j + K_{aj33} j^2 \quad (15)$$

$$K_{abp1} = K_{abj11} + K_{abj12} j + K_{abj13} j^2 \quad (16)$$

$$K_{abp2} = K_{abj21} + K_{abj22} j + K_{abj23} j^2 \quad (17)$$

$$K_{Kp1} = K_{Kj11} + K_{Kj12} j + K_{Kj13} j^2 \quad (18)$$

$$K_{Kp2} = K_{Kj21} + K_{Kj22} j + K_{Kj23} j^2 \quad (19)$$

$$K_{Mp1} = K_{Mj11} + K_{Mj12} j + K_{Mj13} j^2 \quad (20)$$

$$K_{Mp2} = K_{Mj21} + K_{Mj22} j + K_{Mj23} j^2 \quad (21)$$

$$K_{Mp3} = K_{Mj31} + K_{Mj32} j + K_{Mj33} j^2 \quad (22)$$

Влияние температуры  $T$  дает систему уравнений, которые формируются за тем же принципом формулы (12), поэтому для сокращения система уравнений подается не в полном виде

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{aj11} = K_{aT111} + K_{aT112} T + K_{aT113} T^2 \\ K_{aj12} = K_{aT121} + K_{aT122} T + K_{aT123} T^2 \\ \dots \\ K_{Mj32} = K_{MT321} + K_{MT322} T + K_{MT323} T^2 \\ K_{Mj33} = K_{MT331} + K_{MT332} T + K_{MT333} T^2 \end{array} \right. \quad (23)$$

Дальнейшая расшифровка коэффициентов системы (23) через влияние напряжения межэлектродного потенциала  $U$  приводит к таблице начальных коэффициентов аппроксимационной модели расчета ЭСПП, а общая структура уравнений демонстрируется системой (24)

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{aT111} = K_{aU1111} + K_{aU1112} U + K_{aU1113} U^2 \\ K_{aT112} = K_{aU1121} + K_{aU1122} T + K_{aU1123} T^2 \\ \dots \\ K_{MT332} = K_{MU3321} + K_{MU3322} T + K_{MU3323} T^2 \\ K_{MT333} = K_{MU3331} + K_{MU3332} T + K_{MU3333} T^2 \end{array} \right. \quad (24)$$

Полученная таким образом база данных начальных коэффициентов полностью автономна, а программное обеспечение с ней работает практически мгновенно.

Поскольку форма распределения приведенного ЭСПП нейтральных компонентов (рис. 1.73) существенно отличается от рис. 1.72, то распределение вероятности приведенного ЭСПП определяется

$$j_{\varepsilon_{vni}} = 1 - F^{-1}(\varepsilon_{vn}), \quad (25)$$

где  $F^{-1}(\varepsilon_{vn})$  – обратная функция интегрального распределения вероятности  $F(\varepsilon_{vn})$ ,

$$F(\varepsilon_{vn}) = q_{\beta} \left( \frac{iU}{z_c \varepsilon_1} \right) j_{vnm}, \quad (26)$$

$q_{\beta}(\varepsilon_{vni})$  – интегральное распределение вероятности определенного энергетического уровня нейтралов  $\varepsilon_{vni}$ ,

$$\varepsilon_{vni} = \frac{iU}{z_c \varepsilon_0} = \varepsilon_i / \varepsilon_0, \quad 0 < \varepsilon_{vni} < 1, \quad (27)$$

$\varepsilon_0$  – максимальный энергетический уровень первого к катоду ПБДН.

$$q_{\beta}(\varepsilon_{vi}) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)+\Gamma(b)} \int_0^{\varepsilon_{vi}} t^{(a-1)} \cdot (1-t)^{(b-1)} dt \quad (28)$$

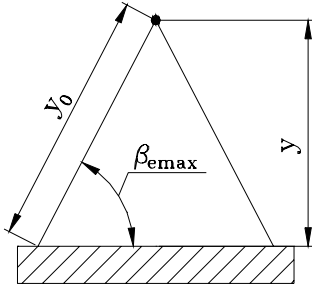
Аппроксимационная модель для нейтралов формируется аналогично методике, описанной выше для ионных компонентов, с той только разностью, что все зависимости, как это установлено анализом результатов расчета ЭСПП, являются полиномами второй степени.

Практическая апробация изложенной методики формирования параметров ЭСПП показала, что отклонение полученных значений от расчетных укладывается в 3% в любой точке многофакторной модели массива данных. При этом обеспечивается возможность определения параметров ЭСПП для произвольной комбинации показателей технологического режима. Подобный результат - приемлемый для использования в инженерной практике.

Как отмечалось выше, для прогнозирования характера взаимодействия ЭСПП с поверхностью кроме абсолютных значений энергий частиц существенную роль играет их угол вхождения в поверхность. Таким образом, дальнейшее исследование вопроса возможно после определения углового распределения частиц падающего потока.

Специфика формирования потока нейтралов

бесстолкновительного движения заключается в том, что резонансная перезарядка может иметь место в любой точке ПБДН. При этом положение координаты  $y$  точки, где происходит акт резонансной перезарядки (координата измеряется от катода) в пределах  $[0...y_0]$  ширины ПБДН - равновероятно. Значение энергии частицы в



*Рис. 1.74. Схема для определения углового распределения нейтралов*

момент, когда состоялась резонансная перезарядка, в пределах  $[0...E_0]$  также равновероятно.

Поэтому распределение частиц по углу вхождения в поверхность при произвольном энергетическом уровне формируется согласно рис. 1.74. На поверхность попадут только нейтралы, траектория движения которых находится внутри конуса с углом при основании  $\beta_{max}$ . При этом очевидна равновероятность

любого угла в пределах  $[0... \beta_{max}]$ . Тогда распределение энергетического спектра нейтралов бесстолкновительного движения в зависимости от угла  $\beta_e$ , который измеряется между направлением движения нейтральной частицы и нормалью к поверхности (вектор поля), определяется

$$j_{env\beta i}(\beta_e) = j_{envi} \cos(\beta_e). \quad (29)$$

Очевидно, что в этом случае для каждого энергетического уровня ЭСПП условие нормирования выполняется

$$\int_0^{\pi/2} j_{env\beta i}(\beta_e) d\beta = \int_0^{\pi/2} j_{envi} \cos(\beta_e) d\beta_e = j_{envi}. \quad (30)$$

Относительно нейтралов столкновительного движения, то отличие от предыдущего случая заключается только в том, что причиной появления нейтралов этого типа есть столкновение уже прежде образованной в результате резонансной перезарядки нейтральной частицы. Поскольку к катоду могут долететь опять таки только нейтралы, столкновение которых состоялась в пределах первого ПБДН, то картина формирования углового распределения ЭСПП отвечает схеме на рис. 1.74 и формуле (29). Пространственная картина углового распределения ЭСПП нейтральных частиц отвечает рис. 1.75.

При формировании углового распределения потоков ионов

исходим из того, что в каждом столкновении ион теряет большую часть энергии и начинает движение в каждом из периодов между столкновениями со скорости, практически близкой к нулю [2], а энергия иона в момент вхождения в поверхность в основном формируется разностью потенциалов катода и точки последнего столкновения. Аналогичная ситуация еще более характерна

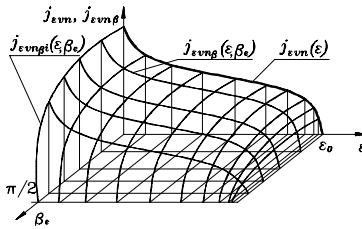


Рис. 1.75. Угловое распределение ЭСПП нейтральных частиц

для ионного потока, если учесть высокую вероятность резонансной перезарядки, когда только что образованные ионы двигаются, начиная с нулевой скорости. Положение точки последнего столкновения в пределах первого ПСП определяет предельный угол вхождения в поверхность  $\beta_n$

$$\beta_n = \arccos \frac{\epsilon}{\epsilon_1}, \tag{31}$$

где  $\epsilon$  - текущее значение энергии ионов.

Исходя из положения о равновероятности всех углов встречи в пределах  $[0... \beta_n]$ , угловое распределение энергетического спектра ионов рассчитывается для любого энергетического уровня

$$j_{\epsilon\nu\beta i}(\epsilon, \beta) = j_{\epsilon\nu i}(\epsilon) / \beta_{ni}, \tag{32}$$

а пространственная картина углового распределения ЭСПП ионов показана на рис. 1.76.

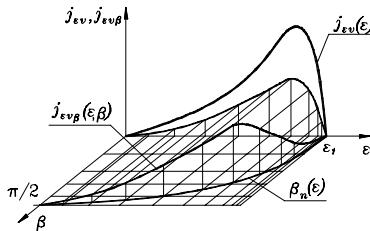


Рис. 1.76. Угловое распределение ЭСПП частиц ионного потока

Металлическая поверхность в общем виде включает разные химические компоненты, количество которых задается содержанием компонента по массе  $K_m$ . Атомное содержимое произвольного компонента в металлической поверхности

$$K_{Ai} = \frac{K_{mi} / m_{Ai}}{\sum_{i=1}^{Z_K} \frac{K_{mi}}{m_{Ai}}}, \tag{33}$$

где  $Z_K$  – общее количество типов компонентов,





$$\varepsilon = \frac{mV^2}{2} = \frac{mV_\beta^2 \cos^2 \theta}{2} = \varepsilon_\beta \cos^2 \theta. \quad (37)$$

Введем термины составляющей энергии взаимодействия, которая определяется нормальной составляющей скорости  $\varepsilon_n$  и составляющей энергии взаимодействия, которое определяется касательной составляющей скорости  $\varepsilon_\tau$ . Учитывая что  $\psi = \theta + \beta$ ,  $90^\circ - \psi = 90^\circ - (\theta + \beta)$ , составляющие скорости определяются

$$V_n = V \sin(90 - \phi) = V \sin(90 - (\theta + \beta)) = V \cos(\theta + \beta) \quad (38)$$

$$V_\tau = V \cos(90 - \phi) = V \cos(90 - (\theta + \beta)) = V \sin(\theta + \beta) \quad (39)$$

Тогда составляющие энергии взаимодействия

$$\begin{aligned} \varepsilon_n &= \frac{mV_n^2}{2} = \frac{mV^2 \cos^2(\theta + \beta)}{2} = \frac{mV_\beta^2 \cos^2 \theta \cos^2(\theta + \beta)}{2} =, \quad (40) \\ &= \varepsilon_\beta \cos^2 \theta \cos^2(\theta + \beta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_\tau &= \frac{mV_\tau^2}{2} = \frac{mV^2 \sin^2(\theta + \beta)}{2} = \frac{mV_\beta^2 \cos^2 \theta \sin^2(\theta + \beta)}{2} =. \quad (41) \\ &= \varepsilon_\beta \cos^2 \theta \sin^2(\theta + \beta) \end{aligned}$$

Из рис. 1.77  $\frac{\rho}{r_0 + r} = \sin(\phi - \beta)$  и  $\rho = (r_0 + r) \sin(\phi - \beta) = (r_0 + r) \sin(\theta)$ ,

поэтому распределение вероятности прицельного параметра

$$w_\rho(\rho) = \begin{cases} \frac{1}{2(r_0 + r)} & \text{при } -(r_0 + r) \leq \rho \leq (r_0 + r). \\ 0 & \text{при } \rho < -(r_0 + r) \text{ або } \rho > (r_0 + r) \end{cases} \quad (41)$$

Из равновероятности прицельного параметра  $\rho$  и угла  $\psi$

$$w_\rho(\rho) d\rho = w_\phi(\phi) d\phi \quad (42)$$

распределение вероятности угла  $\psi$

$$w_\phi(\phi) = \begin{cases} w_\rho(\rho) \frac{d\rho}{d\phi} = \frac{1}{2} \cos(\phi - \beta) & \text{при } |\phi| \leq \frac{\pi}{2}. \\ 0 & \text{при } |\phi| > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (43)$$

При любых значениях угла  $\theta$  составляющая энергии взаимодействия, которая определяется касательной составляющей скорости, будет влиять на результат энергетического действия в виде распыления поверхности. Составляющая же энергии, которая определяется нормальной составляющей скорости, при значениях угла  $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} - \beta$  будет оказывать содействие диффузионным процессам, а также химическим превращением в приповерхностном

слое, если же  $\frac{\pi}{2} - \beta < \theta \leq \frac{\pi}{2}$ , то влияние составляющей энергии,

определяемой нормальной составляющей скорости, направленной теперь от поверхности, приведет к эффекту ее распыления. Учитывая вероятностный характер соотношения геометрических параметров взаимодействия частиц падающего потока и поверхности введем показатели, с помощью которых возможно было бы оценить оба из названных эффектов.

Коэффициент распыляющего влияния

$$K_{ps} = \int_{-\frac{\pi}{2}+\beta}^{\frac{\pi}{2}+\beta} \frac{1}{2} \cos^3(\phi - \beta) \sin^2 \phi d\phi + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}+\beta} \frac{1}{2} \cos^3(\phi - \beta) \cos^2 \phi d\phi \quad (44)$$

В связи с тем, что  $\psi = \theta + \beta$ ,  $\psi - \beta = \theta$ ,  $d\psi = d\theta$ , заменим границы интегрирования для случая, когда в качестве аргумента будет использоваться угол  $\theta$

$$K_{ps} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \cos^3 \theta \sin^2(\theta + \beta) d\theta + \int_{\frac{\pi}{2}-\beta}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \cos^3 \theta \cos^2(\theta + \beta) d\theta \quad (45)$$

Аналогично коэффициент диффузионного влияния

$$K_{os} = \int_{-\frac{\pi}{2}+\beta}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{2} \cos^3(\phi - \beta) \cos^2 \phi d\phi = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}+\beta} \frac{1}{2} \cos^3 \theta \cos^2(\theta + \beta) d\theta \quad (46)$$

Общепринято положение, согласно которому при анализе влияния любого фактора целесообразно определить сумму произведений количества объектов, которые владеют определенным значением этого фактора, на значение самого фактора [11, т. 2, с. 91]. В аспекте этого положения относительно вопроса о влиянии энергетического фактора на все процессы, которые могут иметь место на границе газ - металлическая поверхность, предлагается ввести показатель относительного энергетического фактора (ОЭФ) действия того или иного типа, как суммы по всем энергетическим уровням произведений энергетического уровня на относительный поток с учетом вероятностных характеристик как энергетического уровня, так и геометрических параметров взаимодействия частиц падающего потока и поверхности (включение в термин понятия «относительный» связано с тем, что все теоретические выкладки до сих пор базировались на понятии относительного ЭСПП [1,2]). Соответственно указанному - ОЭФ распыляющего или диффузионного воздействия должен отображаться как распределение ОЭФ с учетом коэффициентов распыляющего или

диффузионного влияния. Отсюда ОЭФ распыляющего воздействия потока ионов определится

$$F_{sp+} = \sum_{i=0}^{z_c-1} \int_0^{\beta_n(\varepsilon_i)} j_{\varepsilon\beta}(\varepsilon_i, \beta) \varepsilon_i K_{pe}(\beta) d\beta = \sum_{i=0}^{z_c-1} \int_0^{\beta_n(\varepsilon_i)} \frac{j_{\varepsilon\beta}(\varepsilon_i)}{\beta_n(\varepsilon_i)} \varepsilon_i K_{pe}(\beta) d\beta \cdot (47)$$

Предельный угол  $\beta_n$  определяется по формуле (31) при  $\varepsilon = \varepsilon_i$ .

ОЭФ распыляющего воздействия нейтрального потока аналогично

$$F_{spn} = \sum_{i=0}^{z_c-1} \int_0^{\pi/2} j_{\varepsilon n\beta}(\varepsilon_i, \beta) \varepsilon_i K_{pe}(\beta) d\beta = \sum_{i=0}^{z_c-1} \int_0^{\pi/2} j_{\varepsilon n}(\varepsilon_i) \cos \beta \varepsilon_i K_{pe}(\beta) d\beta \cdot (48)$$

Общий ОЭФ распыляющего воздействия

$$F_{sp} = F_{sp+} + F_{spn} \cdot (49)$$

В тех случаях, когда действие энергетического потока ограничено некоторым минимальным энергетическим уровнем, например, определенное действие не может наступить, пока энергия частицы падающего потока не достигнет этого минимума [11, т.2, с. 119], минимальный индекс в суммах должен отвечать индексу энергетического уровня ограничения

$$z_{\min} = \frac{z_{\min}}{\Delta_\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\min} z_c}{U} \cdot (50)$$

По аналогии с (47) и (48) ОЭФ диффузионного воздействия для потоков ионов и нейтралов рассчитывается

$$F_{sd+} = \sum_{i=0}^{z_c-1} \int_0^{\beta_n(\varepsilon_i)} j_{\varepsilon\beta}(\varepsilon_i, \beta) \varepsilon_i K_{de}(\beta) d\beta = \sum_{i=0}^{z_c-1} \int_0^{\beta_n(\varepsilon_i)} \frac{j_{\varepsilon\beta}(\varepsilon_i)}{\beta_n(\varepsilon_i)} \varepsilon_i K_{de}(\beta) d\beta \cdot (51)$$

$$F_{sdn} = \sum_{i=0}^{z_c-1} \int_0^{\pi/2} j_{\varepsilon n\beta}(\varepsilon_i, \beta) \varepsilon_i K_{de}(\beta) d\beta = \sum_{i=0}^{z_c-1} \int_0^{\pi/2} j_{\varepsilon n}(\varepsilon_i) \cos \beta \varepsilon_i K_{de}(\beta) d\beta \cdot (52)$$

$$F_{sd} = F_{sd+} + F_{sdn} \cdot (53)$$

ОЭФ воздействия на компонент поверхности сорта  $y$  должен определяться через общий ОЭФ путем умножения его на вероятность столкновения налетающей частицы именно с этим компонентом

$$F_{s\text{py}} = F_{sp} P_{cy} \cdot (54)$$

$$F_{s\text{dy}} = F_{sd} P_{cy} \cdot (54)$$

Критерии оценки процессов в прикатодном пространстве с точки зрения способствования образованию диффундидов будут рассмотрены ниже. В зависимости от энергетического уровня и характера столкновения результат действия энергетического фактора может быть разным. Понятие образующей способности воздействия энергетического фактора исходит из того, что разные компоненты

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
газовой среды могут потенциально обеспечивать разные результаты бомбардировки:

адсорбцию частиц на поверхности;

диссоциацию молекул, которая в комбинации однотипных молекула-молекула (атом-атом) может проходить только при наличии третьего компонента столкновения, которым и есть поверхность, при этом энергия диссоциации существенно уменьшается;

химические реакции образования диффундидов (нитридов, карбидов, боридов и т.п.), в том числе и следующих химических реакций фазовых преобразований;

распыление элементов поверхности;

распыление адсорбата (частиц газа, адсорбированных поверхностью);

рекомбинацию атомарных и молекулярных ионов, в том числе и диссоциативного характера (молекулярные ионы азота);

диффузию атомарных компонентов среды, химических соединений, а также компонентов поверхности в глубину поверхности не только за счет градиента концентрации, но и за счет ударного действия падающего потока.

Кроме того, названные процессы могут иметь температурные ограничения, например химические процессы образования диффундидов могут нивелироваться их распадом вплоть до полного прекращения в связи с достижением поверхностью температуры значений, которые соответствуют температуре распада диффундидов определенного сорта.

Таким образом, предложенные критерии и методика их определения могут быть использованы для анализа влияния параметров технологического режима на результаты модификации, которая позволит оптимизировать технологию.

### ***1.5.2. Модель процессов на границе газ - поверхность***

Конечным результатом взаимодействия металлической поверхности с потоком заряженных и нейтральных частиц, бомбардирующих ее, являются структурные и фазовые преобразования, изменяющие в большей или меньшей степени как функциональные свойства объекта модификации, так и его характеристики, не имеющие значения непосредственно для эксплуатации (например, внешний вид, фактура поверхности и т.п.). В ВДРТ модификации металлических поверхностей падающий на поверхность поток состоит в общем случае из диффузантов -

веществ, которые могут вступать в химическое и физическое взаимодействие с атомами поверхностного слоя, диффундировать в глубину его, изменяя при этом свойства собственно поверхности, а также корректоров, которые на конечные свойства поверхности прямо не влияют, химически нейтральны по отношению к атомам поверхности, но изменяют ход основного процесса обработки деталей, причем обе из названных разновидностей могут нести заряд или быть электрически нейтральными. Учитывая это, результатом взаимодействия падающего потока с поверхностью могут быть следующие процессы:

- адсорбция частиц газа на поверхности и десорбция их в результате как теплового влияния, так и бомбардировки частицами падающего потока;

- передача энергии от частиц падающего потока частицам поверхности с нагреванием ее до рабочей температуры процесса, стимулирующим кроме всего прочего термоэлектронную эмиссию;

- стимулирование ионно-электронной и ударно-электронной (от нейтральных частиц падающего потока) эмиссий [5];

- распыление атомов и фрагментов поверхности с последующим осаждением их под действием направленного движения потоков на поверхностях обрабатываемых деталей, оборудования или удаление из разрядной камеры;

- столкновения атомарных ионов диффузантов с атомами поверхности или атомами, которые входят в распыленные фрагменты поверхности, и последующее образование диффундидов;

- столкновения молекулярных ионов с поверхностью и, в зависимости от энергетического уровня, возможными рекомбинацией или диссоциативной рекомбинацией, образованием атомарных диффузантов и на их основе созданием диффундидов;

- ударная диссоциация или ионизация молекулярных частиц, адсорбированных поверхностью, с последующей диссоциативной рекомбинацией, образованием атомарных диффузантов и на их основе созданием диффундидов;

- преобразование диффундидов в направлении от низших к высшим с высвобождением атомарных компонентов диффузанта;

- диффузия атомарных частиц и диффундидов в глубину поверхности;

- упругие столкновения заряженных частиц падающего потока с поверхностью и отражение их в газовую среду, вторичная бомбардировка поверхности, включая возможность вышеперечисленных процессов, характерных для частиц определенного вида и энергии;

- ударная имплантация частиц газовой среды и проникновение

их и частиц компонентов поверхности под действием падающего потока в глубину поверхностного слоя;

- резонансная перезарядка на металле с диссоциативной рекомбинацией молекулярного иона диффузанта и созданием диффундида.

Поверхность следует рассматривать как особую разновидность дефектов, поскольку она разрушает периодичность твердого тела в одном направлении - перпендикулярно поверхности в сторону газовой среды. В то же время можно, как это будет рассмотрено ниже, считать, что именно наличие поверхности является тем фактором, который делает возможной реакцию образования диффундидов при столкновении атомов металла и диффузанта. Известно, что при адсорбции газов, т.е. концентрировании компонентов газовой среды на поверхности, образовывается мономолекулярный адсорбционный слой - монослой [11, 12]. Заполнение поверхности, т.е. мера сплошности монослоя, при малых значениях давления пропорциональна давлению адсорбата в газовой среде. Скорость адсорбции зависит от показателя сплошности монослоя, при приближении к состоянию сплошного заполнения поверхности адсорбционным слоем она постепенно уменьшается до нуля.

В качестве ключевого положения о вероятности любого из процессов в окрестности поверхности принят тезис об энергетической целесообразности, согласно которому в первую очередь реализуется тот из нескольких возможных видов процессов, который в данных конкретных условиях энергетически наиболее выгоден.

Скорость поступления частиц в адсорбционный слой определяется [12]

$$V_{ads} = 3,51 \cdot 10^{22} p / (TM)^{0,5}, \quad (1)$$

где  $p$  – давление в камере, тор,

$T$  – температура поверхности, °К,

$M$  – молекулярная масса.

Для молекулярного азота при температуре  $T=293$  °К и давлении  $p=1$  тор  $V_{ads}=3,88 \cdot 10^{20}$  см<sup>2</sup>с<sup>-1</sup>, если же считать, что полностью сформированный монослой включает  $10^{15} \dots 2 \cdot 10^{15}$  атом/см<sup>2</sup>, то при коэффициенте прилипания, равном единице, время формирования монослоя по порядку величин составит  $3 \cdot 10^{-6}$  с. Учитывая, что количество частиц определенного сорта в единице площади поверхности

$$n = d^{-2}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр частицы в тех же линейных единицах измерения, которые используются для измерения площади,

то период занятия места в монослое, достаточного для расположения на нем одной частицы

$$t = n/V_{ads} \cdot \quad (3)$$

На рис. 1.78 приведены графики зависимости периода занятия адсорбатом места в монослое от давления в камере для разных компонентов газовой среды, из которого следует, что увеличение периода занятия адсорбатом места в монослое идет в последовательности:  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $Ar$ ,  $H$ ,  $N$ . Эта последовательность указывает на то, что из азотно-аргоновых газовых сред в первую очередь на поверхности адсорбируются аргон и молекулярный азот.

Плотность потока ионов всех сортов определяется через плотность тока

$$j_+ = 0,624 \cdot 10^{19} j \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}. \quad (4)$$

Период бомбардировки одного места в монослое

$$t_{\bar{o}} = 1/0,624 \cdot 10^{15} d^2 j \quad (5)$$

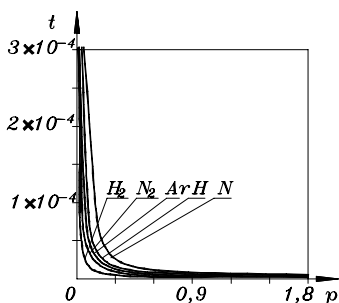


Рис. 1.78. Зависимость периода занятия адсорбатом места в монослое от давления для различных типовых компонентов газовой среды

На рис. 1.79 показана зависимость периода бомбардировки одного места на поверхности от плотности тока. По порядку величин период заполнения мест при давлении 0,8 тор и температуре 560°С для молекулярного и атомарного азота соответственно составляет  $2 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-6}$  с, период бомбардировки одного места в монослое при средней типовой плотности тока  $j=15 \text{ А/м}^2$  соответственно составляет 0,076... 0,304 с. Приведенные данные свидетельствуют о

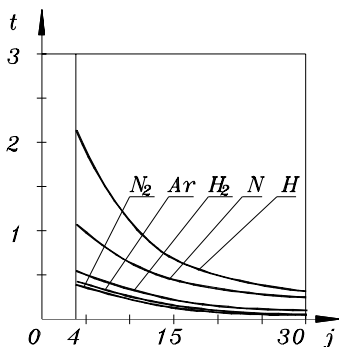
гарантированной сплошности адсорбционного монослоя. Однако с ростом температуры активизируется процесс десорбции, скорость которой определяется [3]

$$V_{ds} = K_{ds} K_{ads}, \quad (6)$$

где  $K_{ds}$  – константа скорости десорбции,

$K_{ads}$  – коэффициент заполнения (сплошности) адсорбционного монослоя.

Двумя основными вариантами десорбции является тепловая и электронно-стимулированная, когда электроны, бомбардирующие поверхность, возбуждают адсорбированные частицы на ней, в результате чего они могут оказаться в потенциале отталкивания относительно поверхности. Для большинства газов зависимость константы скорости десорбции от температуры поверхности имеет



*Рис. 1.79. Зависимость бомбардировки одного места в монослое от плотности тока для разных типовых компонентов газовой среды*

несколько четких пиковых экстремумов, причем типичные температуры рассматриваемых технологических процессов лежат в промежутке между двумя пиками. Поэтому важно обеспечить такой режим выхода на рабочую температуру, чтобы по возможности скорее проходить температурные зоны пиков десорбции. В этом случае оправдано предположение, что адсорбция превалирует над десорбцией, т.е. на поверхности всегда должен быть адсорбционный монослой частиц газа большей или меньшей плотности.

Хемосорбированные и физически сорбированные частицы газа на поверхности отличаются типом электронной связи адсорбата с основой. Верхняя граница для физической адсорбции представляет всего 0,6 эВ, что гарантирует распыление физически адсорбированных частиц газа при столкновении практически с любой частицей падающего потока в тлеющем разряде. Энергия хемосорбции как правило находится в пределах 1...8 эВ [12, с. 378]. Когда молекула попадает на поверхность, дальнейшая ее судьба может реализовываться по одному из сценариев: молекула может быть отражена снова в газовую среду; остаться на ней; проникнуть в глубину поверхностного слоя; диссоциировать на атомы; вступить в химическое взаимодействие с атомами металла [13]. Каждый из этих сценариев имеет определенную вероятность в зависимости от, прежде всего, энергии молекулы, химической активности атомов, кристаллической структуры металлической поверхности, ее состава. Считается, что когда энергия молекулы по порядку величин 0,1 эВ, то она останется на поверхности благодаря физической сорбции, если же энергия молекулы несколько электрон-вольт, то она уже



сможет преодолеть потенциальный барьер приповерхностного слоя, проникнуть в глубину ее, причем обмен электронами между атомами создаст условия для химической сорбции или химической реакции [4, с. 241].

При относительно малых кинетических энергиях ионов, бомбардирующих поверхность (не больше нескольких десятков электрон-вольт, что соответствует реалиям процессов АТР), характер их взаимодействия с поверхностью определяется переносом зарядов, необходимых для нейтрализации иона. В упрощенном варианте, когда ион рассеивается после столкновения с поверхностью, энергетический импульс в целом направлен вглубь твердого тела, при этом энергообмен соответствует формуле [12, с. 251]

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} = \frac{1}{(1+a)^2} \left[ \cos \theta_1 \pm (a^2 - \sin^2 \theta_1)^{0,5} \right]^2, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_1$  – энергии налетающего иона и рассеянного после столкновения иона,

$\theta_1$  – угол между направлениями вхождения в столкновение и рассеяния иона после столкновения,

$a$  – соотношение масс атома поверхности и иона,  $a = m_2/m_1$ , причем знак „плюс” принимается, если соотношение масс больше единицы, „минус” – когда меньше.

Атом поверхности получает в результате столкновения энергию  $\varepsilon_2$  и отражается под углом  $\theta_2$ , который измеряется аналогично предыдущему

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_0} = \frac{4a}{(1+a)^2} \cos^2 \theta_2, \quad (8)$$

Элементарная кинетическая теория газов исходит из представления о молекулах как идеально упругих шарах, поэтому СДСП молекулы идеального газа полностью определяется диаметром и концентрацией частиц. В диапазоне энергий 0,1...100 эВ одномерная модель кубов [12] не может применяться и полностью заменяется моделью шаров. Взаимодействие нейтральной частицы с поверхностью в зависимости от энергетического уровня может быть как упругим, так и неупругим. Рассеяние частиц падающего потока поверхностью реализуется в зависимости от их начальной энергии по разным сценариям: частица после столкновения теряет значительную энергию и захватывается поверхностью или адсорбируется ею, часть из них потом может десорбировать по общим законам этого процесса; частица теряет только часть энергии и рассеивается в газовую среду; классическое упругое рассеяние. Возможны промежуточные варианты, когда

потеря энергии недостаточна для реализации ни одного из названных процессов. Классическая теория неупругого рассеяния справедлива до энергий порядка 100 эВ [12, с. 476]. Нагрев локальной зоны порядка нескольких атомов за время  $5 \cdot 10^{-12}$  с при диссипации энергии 300 эВ может достигь температур плавления, часть атомов может просто испариться, однако уже через  $20 \cdot 10^{-12}$  с температура зоны снижается до 150°C [4, с. 227].

Отдельные атомы и фрагменты поверхности, покидающие ее в результате диссипации энергии иона, в большинстве случаев pochodят из первых двух слоев. Результатом удара падающего на поверхность иона есть каскад столкновений. Распыленные частицы имеют относительно небольшую энергию (максимум распределения меньше 10 эВ [12, с. 314]), тем не менее и этой энергии во многих случаях достаточно для реакции образования диффундидов даже без учета энергии второй частицы - соучастницы столкновения. Кроме того, в случае бомбардировки их почти параллельно поверхности возможно выбивание из поверхности отдельных атомов с относительно высокими энергиями. Для расчета коэффициента распыления энергия связи на поверхности как правило принимается равной энергии возгонки твердого тела. Распыленные частицы в основном поступают в газовую среду с первых одного - двух слоев поверхности. Это подтверждается, например, тем, что потоки распыленных частиц дают информацию только о первый нескольких слоях поверхности [12, с. 333]. Существенную роль в процессе распыления поверхности играют величина работы выхода, а также кристаллическая структура поверхности. Плотно упакованные кристаллические грани характеризуются высокими значениями работы выхода, наоборот, атомно-неоднородные или неплотно упакованные - малыми. Решающий вклад в распыление вносит первое столкновение частиц падающего потока с атомом поверхности, поскольку в этом случае наибольшая вероятность передачи значительной части энергии, которую имеет эта частица. Еще на подлете к поверхности ионы своим полем могут вырывать из поверхности электроны, хотя ситуация автоэлектронной эмиссии характерна для более значимых энергий. В принципе взаимоотношения частиц должны рассматриваться с помощью законов квантовой механики, тем не менее значительные трудности при решении волнового уравнения Шредингера приводят к логическому в пределах сравнительно малых энергий использованию классической механики. При относительно небольших энергиях столкновение рассматривается согласно модели твердых шаров. Коэффициент распыления в диапазоне энергий до 140 эВ практически линейно зависит от энергии бомбардирующей

частицы [4, с. 65], например, при бомбардировке ионами аргона железной поверхности эта зависимость имеет вид

$$S = 0.00046(\varepsilon - 12) \text{ атом/ион}, \quad (9)$$

т.е. по порядку величин при энергии бомбардирующей частицы около 120 эВ коэффициент распыления составляет всего 0,05 атом/ион. Максимальный выход достигается при приблизительном равенстве масс частиц – участников столкновения, а также для тех элементов, которые имеют заполненную  $d$ -оболочку, что, кстати, совпадает с аналогичной зависимостью для теплоты возгонки, минимальная способность распыления у тех элементов, в которых  $p$  и  $d$  оболочки или отсутствуют, или только начинают заполняться (например водород, гелий). От поверхности отражается меньшая часть ионов, чем в ней остается. Энергия порога, которая с учетом коэффициента энергопередачи обеспечивает энергетический импульс, достаточный для распыления, для разных комбинаций ион-металл находится в пределах 5...20 эВ [4, с. 100-105]. Наиболее существенно на процесс распыления влияют столкновения с атомами первого поверхностного слоя, столкновения с атомами более глубоко расположенных слоев практически не приводят к распылению. Вероятная причина этого заключается в очень интенсивной диссипации энергии, привнесенной частицами падающего потока, поскольку дальнейшие столкновения атомов решетки практически одинаковой массы проходят с интенсивным энергообменом, возбуждение быстро затухает, поверхность нагревается.

Стабильная молекула может образовываться при столкновении двух атомов только в том случае, когда некоторое количество избыточной энергии будет отведено в ходе столкновения с третьей частицей. Вероятность трехчастичных столкновений в разреженной газовой среде практически равняется нулю, но упомянутое выше условие может быть выполнено в случае, когда столкновение первичных компонентов, способных образовывать молекулу, проходит на поверхности или в кластере. Роль последнего могут выполнить фрагменты (не отдельные атомы) поверхности, распыленные в результате бомбардировки поверхности падающим потоком. При этом, как было показано раньше [3], значение энергетических уровней частиц, входящих в структуру падающего потока, могут быть порядка сотни электрон-вольт, что значительно превышает суммарную энергию связи нескольких атомов и делает возможным распыление не только отдельных атомов поверхности, но и их совокупности, т.е. фрагментов. При этом поверхностный атом получает скорость, одна из составляющих которой направлена

в глубину поверхности, а это вызывает каскад столкновений, нарушающих упорядоченность, могущих привести к появлению фрагментов, покидающих поверхность, причем это могут быть как отдельные атомы, так и совокупность атомов. Факт передачи распыленным частицам поверхности значительной энергии подтверждается тем, что они могут пролетать в газовой среде значительные расстояния (порядка 40 мм) от поверхности [14]. Чем интенсивнее идет процесс распыления металла поверхности, который может принимать участие в образовании молекулы диффундида, тем большая вероятность реализации модели трехчастичного столкновения в газовой среде, и, соответственно, создания этих диффундидов. Именно эти аргументы говорят в пользу одной из известных моделей азотирования в тлеющем разряде, где первичным считается образование низших нитридов с последующим постепенным преобразованием их на поверхности в высшие и высвобождением атомарного азота, диффундирующего в глубину поверхности [15-20], хотя даже физическая возможность подобных процессов отрицается в [21]. Когда же названное выше условие не будет выполнено, то молекула, возникшая в результате столкновения двух исходных компонентов реакции образования диффундидов, будет иметь энергию, достаточную для разрыва связей, и уже после первого колебания (приметно –  $10^{-15}$  с) распадется. Стабилизация молекулы за счет излучения избыточной энергии практически невероятна. Следует также заметить, что к реакции приводят только те столкновения, энергия которых превышает некоторую критическую величину – энергию активации, причем вероятность реакции возрастает по мере роста энергии сталкивающихся частиц в сравнении с энергией активации. В большинстве химических реакций энергия активации по порядку величин 10...100 ккал/моль (0,43...4,33 эВ/молекулу) [3, т. 2, с. 123], что при реальных энергетических уровнях частиц падающего потока делает возможной реакцию образования диффундидов. К этому заметим, что молекулярный ион азота можно считать радикалом, а большинство реакций именно и есть реакциями с участием радикалов или атомов [3, т. 2, с. 237]. В пользу тезиса о положительной для реакции образования диффундидов роль поверхности или распыленных ее фрагментов (не отдельных атомов) как фактора возможности реализации схемы трехчастичного столкновения говорит сопоставление времени состояния электронно возбужденного атома или молекулы ( $10^{-8}$  с) и промежутка соударения частиц ( $10^{-12}$  с) [3, т. 2, с. 80], т.е. после столкновения с первым атомом поверхности или ее фрагмента, последующего смещения его вплоть до удара в соседний атомом суммарная

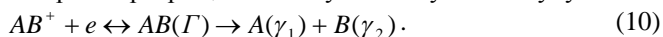
кинетическая энергия комплекса может быть передана третьей частице, стабилизирующей образовавшуюся молекулу диффундида.

Для диссоциации молекул за счет энергии, передаваемой при столкновении, главную роль играет колебательная и в некоторой мере вращательная энергия. Наличие твердой поверхности значительно улучшает условия для диссоциации. Диссоциация на нагретых поверхностях может проходить благодаря двум факторам: в результате передачи электронного возбуждения частиц поверхности молекулам, которые ударяются в поверхность; вследствие уменьшения энергии диссоциации адсорбированных на поверхности молекул к уровню, который меньше энергии диссоциации тех же молекул, расположенных в объеме. Расчеты [3, т.2, с. 78] показывают, что поверхность играет роль катализатора диссоциативных процессов, при этом теплота диссоциации уменьшается практически в 2,5 раза.

Электрон может туннелировать через потенциальный барьер возле поверхности на соответствующий энергетический уровень иона, при этом его собственная энергия не будет изменяться, в результате может наступить резонансная нейтрализация. Для большинства металлов налетающие ионы нейтрализуются резонансно. При этом известно [12, с. 257], что ионы с малой энергией имеют возможность взаимодействовать с поверхностью на протяжении относительно большего времени, поэтому они успевают нейтрализоваться еще к достижению ими поверхности. Нейтрализация ионов на металле есть сугубо поверхностным процессом в отличие от процессов, которые имеют место в глубине металла. При этом излучаемые электроны появляются как правило вне металла или в крайнем случае в пределах первого слоя металла. Известно также [12, с. 287], что низкоэнергетические ионы лучше взаимодействуют с поверхностью в аспекте нейтрализации. Перенос заряда валентными электронами поверхности в ситуации, когда ион приближается к поверхности, может привести к нейтрализации иона, причем скорость нейтрализации возрастает по закону экспоненты при уменьшении расстояния к поверхности. Особенно в значительной степени увеличивается вероятность нейтрализации иона, если он находится значительное время на коротком расстоянии от поверхности, например - при многократном рассеянии, характерном для ионов, бомбардирующих поверхность под большим углом. При проникновении иона под верхний атомарный слой поверхности его нейтрализация будет еще в большей мере возможной.

Диссоциативную рекомбинацию молекулярных ионов азота следует считать одним из ключевых моментов генерации атомарного

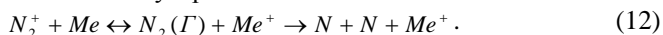
*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
 азота и дальнейшего образования нитридов или диффузии атомов азота в глубину поверхности. Молекулярный ион при столкновении с частицей матрицы захватывает электрон или из среды свободных электронов, или от частицы поверхности и нейтрализуется. Причина диссоциативной рекомбинации в том, что молекулярный ион после захвата электрона превращается в неустойчивую молекулу



Конкретно относительно молекулярного иона азота причину неустойчивого состояния рекомбинированной молекулы составляет относительно высокий энергетический уровень молекулярного иона азота (приблизительно 24 эВ при энергии диссоциации молекулярного иона азота 8,73 эВ) [22, с. 410]. После рекомбинации молекулярного иона в результате ударного столкновения с электроном энергия нейтральной молекулы более чем в два раза превышает сумму энергетических состояний двух атомов азота, поэтому рекомбинация молекулярного иона азота всегда проходит по диссоциативной схеме



Еще один из вариантов ситуаций, при которой создаются условия для диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов, состоит в возможности ионизации атома металла в результате столкновения с молекулярным ионом азота



Этот вариант имеет высокую вероятность, если учесть относительно небольшие потенциалы ионизации наиболее распространенных компонентов сплавов (Fe – 7,89 эВ; С - 11,26 эВ; Cr - 6,77 эВ; Ni - 7,64 эВ; Mo - 7,1 эВ, что существенно меньше, чем для азота - 14,53 эВ или аргона 15,76 эВ [21]). Следует также заметить, что энергия диссоциации молекул практически всех нитридов значительно меньше энергии диссоциации молекулярного азота [23].

Если же новообразованные атомы азота будут иметь, как остаточную, энергию, достаточную для образования нитрида, то при благоприятных условиях (например, новообразовавшийся атом, продолжая двигаться в кристаллической решетке, наталкивается на атом металла) нитриды этого металла могут быть образованы. Эта схема в большей мере возможна в случае, когда ион рекомбинирует внутри кристаллической решетки, т.е. вследствие случайно созданных условий первичное столкновение имеет место под первым слоем атомов поверхности. Об энергетической возможности реализации подобной схемы говорят следующие справочные данные [13, 23]: стандартная теплота образования FeN  $\Delta H=5$  ккал/моль=0,22

эВ (для других металлов, которые используются в качестве легирующих добавок теплота образования нитридов также сравнительно небольшая, равно как и энергия преобразований низших нитридов в высшие), энергия разрыва связи N-N составляет 27 ккал/моль или 1,17 эВ, N=N 80 ккал/моль или 3,46 эВ. Другой вариант ситуации, которая тоже может привести к образованию нитрида, предусматривает адсорбцию атома азота, возникшего в результате рекомбинации, на поверхности, дальнейшую передачу ему энергии в результате удара частицами падающего потока, последовательные по схеме, которая аналогична тройной, столкновения с частицами матрицы и, как результат - образование нитридов.

Качественный анализ технологических параметров режима

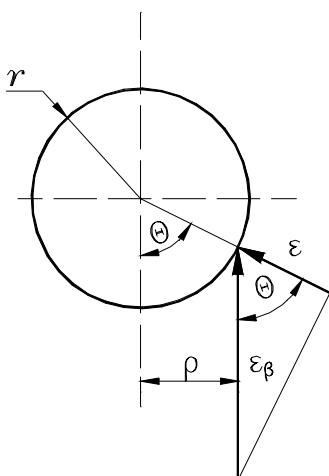


Рис. 1.80. Схема для расчета параметров энергопередачи

модификации металлических поверхностей в тлеющем разряде, которые в свою очередь формируют соответствующий ЭСПП, с точки зрения содействия их образованию нитридов возможно путем введения понятия

относительного энергетического фактора (ОЭФ) образование нитридов. Схема для расчета энергопередачи показана на рис. 1.80. Частица падающего потока, имеющая энергию  $\epsilon_\beta$  и соответственно скорость  $V_\beta$ , входит в столкновение с атомом металла при некотором случайном

параметре  $\rho$ . Первичной в

определении характера энергообмена является роль энергии, которая определяется проекцией скорости относительного движения частиц – участников столкновения на направление линии, соединяющей центры этих частиц. Неупругий удар возможен в том случае, когда энергия падающей частицы равна той энергии, которая необходима для перехода электронов в молекуле в любое состояние, разрешенное правилами отбора [3, т. 2, с. 71]. Соотношение между энергиями, определяемыми скоростью иона и проекцией этой скорости на линию связи центров частиц - соучастниц столкновения, определяются, исходя из уравнений

$$\varepsilon = \frac{V^2 m}{2}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_\beta = \frac{V_\beta^2 m}{2}, \quad (14)$$

$$V = V_\beta \cos \theta, \quad (15)$$

$$\varepsilon = \frac{m V_\beta^2 \cos^2 \theta}{2} = \varepsilon_\beta \cos^2 \theta. \quad (16)$$

Поскольку  $\rho/r = \sin \theta$ , то  $\rho = r \sin \theta$ , и, при однозначной связи между прицельным параметром и углом передачи, вероятности их равны

$$P(\rho) = w_\rho(\rho) d\rho = P(\theta) = w_\theta(\theta) d\theta, \quad (17)$$

то

$$w_\theta = w_\rho(\rho) \frac{d\rho}{d\theta}. \quad (18)$$

Распределение вероятности прицельного параметра – равномерное  $w_\rho(\rho) = 1/r$ , а  $d\rho/d\theta = r \cos \theta$ , поэтому  $w_\theta(\theta) = \cos \theta$ .

Дальше схема взаимодействия соответствует прямому центральному удару при неподвижной до удара частице поверхности (скорость теплового движения атомов поверхности незначительна в сравнении со скоростью налетающей частицы падающего потока). Потери энергии, т.е. мера передачи ее от частицы потока частице поверхности, зависят от типа столкновения, а она в свою очередь – от энергии налетающей частицы. Сечения упругих столкновений частиц значительно превышают сечения неупругого удара, сопровождающегося переходами между электронными состояниями частиц [24, с. 9].

В общем виде энергия, передаваемая от налетающей частицы контрчастице

$$\varepsilon_\Delta = K_{en} \varepsilon, \quad (19)$$

где  $K_{en}$  – коэффициент энергопередачи, который определяется в зависимости от характера столкновения, в случае же, если столкновение носит упругий характер, то для случая с предварительно неподвижной контрчастицей [3, т. 2, с. 71].

$$K_{en} = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{4a}{(a+1)^2}. \quad (20)$$

Тем не менее, условием прохождения реакции синтеза молекулы диффундидов есть создание ситуации, которая отвечала бы трехчастичному столкновению, т.е. после первичного



столкновения атома диффузанта с атомом поверхности или ее фрагмента они должны вместе двигаться к следующему столкновению еще с одним атомом. Только в этом случае

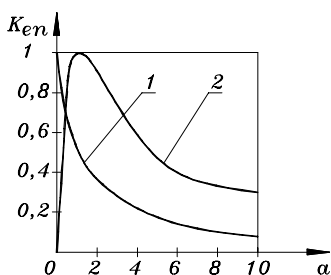


Рис. 1.81. Зависимость коэффициента энергопередачи от типа столкновения  $m$  отношения масс, 1- неупругое столкновение, 2- упругое

избыточная энергия будет передана третьей частице и новообразованная молекула стабилизируется. Для такого случая при том же условии предварительно неподвижной контрчастицы коэффициент энергопередачи [25, т. 2, с. 304].

$$K_{en} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} = \frac{1}{a + 1}. \quad (21)$$

На рис. 1.81 показана зависимость коэффициента энергопередачи от коэффициента отношения масс налетающей частицы и контрчастицы при разных типах столкновений.

Очевидно, что предпосылкой возникновения реакции образования диффундидов будет отбор только той части падающего потока, которая, во-первых, может быть компонентом будущих диффундидов, во-вторых, может передать контрчастице энергию  $\mathcal{E}_d$ , ограниченную величинами: с минимальной стороны энергией образования соответствующего диффундида  $\mathcal{E}_d$ ; с максимальной — энергией, при которой контрчастица покидает поверхность (распыляется), т.е. энергией возгонки  $\mathcal{E}_{sb}$ . Кроме того, если частица падающего потока является молекулой и для образования диффундида она предварительно должна диссоциировать, то минимальная энергетическая граница должна учитывать также энергию диссоциации молекулы  $\mathcal{E}_d$ . Дальше в действие вступают вероятностные характеристики процесса образования диффундидов, зависящие от конкретных мгновенных ситуаций взаимодействия частиц, поскольку имеет значение, например, для молекулы, даже какой стороной она будет контактировать с элементом поверхности. Определенную прибавку количества диффундидов даст также процесс активации адсорбированных поверхностью атомов диффузанта за счет передачи ему энергии, достаточной для проведения реакции образования диффундидов, после бомбардировки их частицами падающего потока, независимо от того являются они диффузантами или нет. Эти характеристики

классически отображаются сечением процесса, определяемого экспериментально. В этом случае становится возможным заложить основы количественных расчетов образования диффундидов в конкретных условиях, как это, например, выполнялось в расчете ЭСПП [1, 2].

Как детально рассмотрено раньше [3], каждому энергетическому уровню в пределах ЭСПП соответствует определенное значение относительного ЭСПП  $J_{ev}$ . Обозначим через  $k$  индекс сорта компонента поверхности при общем их количестве  $c$ , а через  $i$  – индекс энергетического уровня частиц падающего потока при общем их количестве на единицу меньше количества уровней разбивки спектра  $z_c$  (начальное значение индекса энергетических уровней принято нулевым). Поскольку поверхность может состоять из нескольких компонентов, то относительный ЭСПП должен быть распределен между отдельными компонентами поверхности соответственно вероятности столкновения налетающей частицы с компонентом поверхности  $k$ -го сорта  $P_{ck}$  [26]. Роль отдельных компонентов падающего потока (сценарии их поведения при достижении поверхности) отображены в табл. 1.14. В ней не рассматриваются, равно как и в общей постановке задачи, отрицательные и многозарядные ионы по той причине, что при образовании отрицательных ионов по схеме  $A + e \leftrightarrow A^- - \Delta H^\circ$  выделяется энергия, которую нужно немедленно (за время не больше одного периода колебания) отвести, так как иначе ион распадется. Для этого наиболее пригодны и необходимы в газовой среде активные компоненты, способные к прилипанию, например, кислород, но его присутствие в камере при азотировании в тлеющем разряде категорически недопустимо. Как утверждается в [22, с. 402] отрицательные ионы азота и аргона вообще не существуют. Для образования многозарядных ионов необходимы или столкновения с энергией, достаточной для выбивания сразу двух электронов (порядка нескольких килоэлектрон-вольт, а такие энергетические уровни не характерны для реальных процессов в тлеющем разряде), а также тройные или последовательные столкновения с электронами, причем период этих столкновений должен быть меньшим времени диссипации энергии, полученной от предыдущего столкновения. С учетом низкого коэффициента ионизации (по порядку величин  $10^{-6} \dots 10^{-8}$ ) эти процессы также практически невероятны. Анализируя табл. 1.14, можно прийти к заключению, что последние два вида компонентов падающего потока с точки зрения способствования образованию диффундидов - маловероятны, поскольку при этом было бы необходимым последовательное благоприятное совпадение

Таблица 1.14

**Сценарии поведения компонентов падающего потока при столкновении с металлической поверхностью**

Компонент падающего потока	Возможное взаимодействие частицы с поверхностью
Молекулярные ионы диффузанта $D_2^+$	Бомбардировка поверхности и адсорбционного слоя с нагреванием поверхности, рекомбинация или резонансная перезарядка на атомах металла, диссоциация, дальше – в зависимости от уровня энергии: адсорбция поверхностью, распыление; десорбция или диффузия в глубину поверхности, в том числе – ударная; образование диффундидов, их диффузия, формирование зоны диффундидов
Атомарные ионы диффузанта $D^+$	Бомбардировка поверхности и адсорбционного слоя с нагреванием поверхности, рекомбинация или резонансная перезарядка на атомах металла, дальше – в зависимости от уровня энергии: адсорбция поверхностью, распыление; десорбция или диффузия в глубину поверхности, в том числе – ударная; образование диффундидов, их диффузия, формирование зоны диффундидов
Молекулярные и атомарные ионы корректора	Бомбардировка поверхности, рекомбинация или резонансная перезарядка на атомах металла, дальше – в зависимости от уровня энергии: адсорбция поверхностью, распыление; десорбция, диффузия или имплантация в глубину поверхности, в том числе – ударная; передача энергии частицам адсорбционного слоя или металла с нагревом поверхности
Нейтральные компоненты	Бомбардировка поверхности, рекомбинация или резонансная перезарядка на атомах металла, дальше – в зависимости от уровня энергии: адсорбция поверхностью, распыление; десорбция, диффузия или имплантация в глубину поверхности, в том числе – ударная; передача энергии частицам адсорбционного слоя или металла с нагревом поверхности, диссоциация молекул; для новообразованных атомов диффузанта и его атомарных нейтралов – возможность образования диффундидов

К таким событиям относятся: достаточный энергетический уровень частиц, бомбардирующих поверхность, ограниченный, тем не менее, с верхней границы энергией возгонки контрчастиц, встреча

с конкретным типом которой - тоже событие случайное; столкновение с определенным нужным типом контрастицы при определенном прицельном параметре, который обеспечивал бы передачу необходимого энергетического импульса; реализация модели трехчастичного столкновения с энергетическими параметрами в пределах, допустимых для образования диффундидов. Очевидно, что общая вероятность этой цепочки взаимозависимых событий практически равняется нулю, поэтому ни ионы корректора, ни нейтралы не рассматриваются в первом приближении в качестве исходных параметров ОЭФ образования нитридов. Таким образом, в формировании ОЭФ образования нитридов будут задействованы только ЭСПП молекулярных и атомарных диффузантов. Такая постановка базируется, кроме того, на выводах о положительной роли для азотирования в тлеющем разряде наличия в падающем потоке атомарных ионов азота [21].

Введем понятие минимальной для молекулярных ионов диффузанта  $\varepsilon_{\min Mk}$ , аналогично – для атомарных  $\varepsilon_{\min Ak}$  и максимальной  $\varepsilon_{\max k}$  энергетических границ образования диффундидов

$$\varepsilon_{\min Mk} = \varepsilon_d + \varepsilon_{\text{Дк}}, \quad (22)$$

$$\varepsilon_{\min Ak} = \varepsilon_{\text{Дк}}, \quad (23)$$

$$\varepsilon_{\max k} = \varepsilon_{\text{sbk}}, \quad (24)$$

Составляющие относительного ЭСПП, распределенные с учетом вероятности столкновения с определенным компонентом поверхности сорта  $k$  (этот индекс указывает собственно на принадлежность параметра к определенному сорту атомов поверхности), соответственно для молекулярного диффузанта

$$j_{\text{эвМк}}(\varepsilon_i) = P_{\text{ck}} j_{\text{эвМ}}(\varepsilon_i), \quad (25)$$

аналогично - для атомарного

$$j_{\text{эвАк}}(\varepsilon_i) = P_{\text{ck}} j_{\text{эвА}}(\varepsilon_i). \quad (26)$$

Молекулярные ионы могут вступать в реакцию образования нитридов только по схеме предыдущей диссоциативной рекомбинации. Поэтому условие достаточного энергетического обеспечения возможности реакции образования нитридов

$$2\varepsilon_{\text{Дк}} \leq K_{\text{enk}} \varepsilon_i \cos^2 \theta - \varepsilon_d \leq \varepsilon_{\text{sbk}} \quad (27)$$

Ограничение по уровню минимальной энергии

$$2\varepsilon_{\text{Дк}} \leq K_{\text{enk}} \varepsilon_i \cos^2 \theta - \varepsilon_d \quad (28)$$

Максимальный угол, при котором еще обеспечивается передача минимальной энергии

$$0 \leq \theta_{\max Mki} = \arccos \left( \frac{2\varepsilon_{\text{Дк}} + \varepsilon_d}{K_{\text{enk}} \varepsilon_i} \right)^{0,5} \leq \frac{\pi}{2} \quad (29)$$

Ограничение по уровню максимальной энергии

$$K_{\text{enk}} \varepsilon_i \cos^2 \theta - \varepsilon_d \leq \varepsilon_{\text{sbk}} \quad (30)$$

Минимальный угол, при котором еще обеспечивается передача максимальной энергии

$$0 \leq \theta_{\min Mki} = \arccos \left( \frac{\varepsilon_{\text{sbk}} + \varepsilon_d}{K_{\text{enk}} \varepsilon_i} \right)^{0,5} \leq \theta_{\max Mki} \quad (30)$$

Аналогично для атомарных ионов диффузанта

$$\varepsilon_{\text{Дк}} \leq K_{\text{enk}} \varepsilon_i \cos^2 \theta \leq \varepsilon_{\text{sbk}} \quad (31)$$

$$0 \leq \theta_{\max Aki} = \arccos \left( \frac{\varepsilon_{\text{Дк}}}{K_{\text{enk}} \varepsilon_i} \right)^{0,5} \leq \frac{\pi}{2} \quad (32)$$

$$0 \leq \theta_{\min Aki} = \arccos \left( \frac{\varepsilon_{\text{sbk}}}{K_{\text{enk}} \varepsilon_i} \right)^{0,5} \leq \theta_{\max Aki} \quad (33)$$

Общие условия: косинусы углов должны рассматриваются в пределах от нуля до единицы, при значениях больших за единицу они приравняются к единице (это правило необходимо ввести, так как при работе программы может возникнуть ситуация в области малых значений энергий, когда косинус формально будет больше единицы).

Поскольку энергетически обеспечивается образование двух нитридов, то значение ОЭФ при определенной энергии молекулярного иона падающего потока умножается на два (другие варианты типа неравномерного распределения энергии между двумя новообразовавшимися атомами диффузанта так, чтобы энергии одного из них было достаточно для образования нитрида при энергетическом уровне другого атома, меньше этого уровня, невозможны). Тогда составляющие ОЭФ образования диффундидов, которые соответствуют определенному энергетическому уровню

$$\begin{aligned} F_{Nik} &= 2j_{\text{envMk}}(\varepsilon_i) \int_{\theta_{\min Mki}}^{\theta_{\max ki}} w_{\theta}(\theta) d\theta + j_{\text{envAk}}(\varepsilon_i) \int_{\theta_{\min Aki}}^{\theta_{\max ki}} w_{\theta}(\theta) d\theta =, \quad (34) \\ &= 2j_{\text{envMk}}(\varepsilon_i) \int_{\theta_{\min Mki}}^{\theta_{\max ki}} \cos \theta d\theta + j_{\text{envAk}}(\varepsilon_i) \int_{\theta_{\min Aki}}^{\theta_{\max ki}} \cos \theta d\theta \end{aligned}$$

Общий ОЭФ образование диффундидов

$$F_N = \sum_{i=0}^{Z_c-1} \sum_{k=1}^c F_{Nik} \quad (35)$$

Если любой качественный показатель диффундида сорта  $k$  имеет значение  $H_k$ , то прогноз данного показателя качества

$$H = \sum_{k=1}^c H_k \sum_{i=0}^{Z_c-1} \frac{F_{Nik}}{F_N} \quad (36)$$

Общая схема поверхностных процессов, имеющих место в вакуумно-диффузионной модификации металлической поверхности в тлеющем разряде показана на рис. 1.82, причем при составлении схемы использованы условные обозначения, приведенные в табл. 1.15. Принятая на схеме система расположения главных компонентов комплекса модификации металлической поверхности, которая по принципу относится к ВДГРТ [27], - поверхности и падающего потока отображает их взаимосвязь. Действительно, именно на поверхности под влиянием падающего потока начинается электронный поток, который в свою очередь, ионизируя газовую среду, вызывает в нем, кроме того, рекомбинационно-диссоциативные процессы, формирующие в совокупности с резонансной перезарядкой падающий поток с определенным энергетическим спектром. Расшифровка поверхностных процессов, которые отображены на рис. 1.82, приведена в табл. 1.16.

Таблица 1.15

**Условные обозначения в схеме поверхностных процессов**

	Падающий поток	+	Компонент в ионизированном состоянии
	Любой компонент газовой среды в нейтральном состоянии	М Д	Молекула металл - диффузант
	Любая молекула газа в нейтральном состоянии	Д	Молекула или атом диффузанта
	Электрон		Все возможные процессы
	Атом газа		Атом металла поверхности

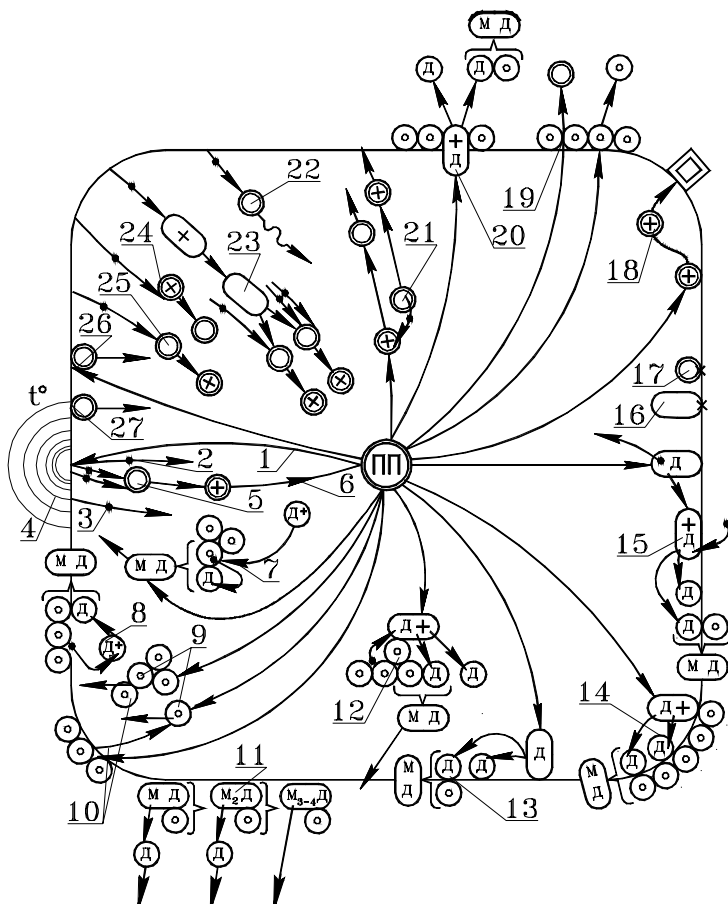


Рис. 1.82. Кольцо массо- и энергообменных процессов в вакуумно-диффузионной модификации металлических поверхностей в тлеющем разряде

**Главные составляющие процесса вакуумно-диффузионной  
модификации поверхности в тлеющем разряде**

Позиция	Описание процессов
1	Бомбардировка поверхности частицами падающего потока
2	Ионно-электронная и ударно-электронная эмиссии
3	Термоэлектронная эмиссия
4	Передача энергии от частиц падающего потока поверхности и ее нагревание
5	Ступенчатая ионизация частиц газовой среды
6	Формирование ионной составляющей падающего потока
7	Столкновения атомов диффузанта с распыленными фрагментами поверхности, образование молекул диффундидов, осаждение диффундидов на металлическую поверхность под направленным действием падающего потока
8	Рекомбинация атомарных ионов диффузанта приповерхностными электронами, осаждение атомов диффузанта на поверхность, столкновение их с атомами металла, образование диффундидов
9	Осаждение распыленных фрагментов и отдельных атомов металла на металлическую поверхность под направленным действием падающего потока
10	Распыление в результате бомбардировки падающим потоком поверхности на отдельные атомы и фрагменты (группы атомов)
11	Последовательное преобразование низших диффундидов в высшие с выделением свободных атомов диффузанта и их диффузией в глубину поверхности вследствие градиента концентрации и ударного действия падающего потока
12	Столкновения молекул диффузанта с распыленными фрагментами поверхности, диссоциативная рекомбинация молекул на атомы, образование молекул диффундидов, осаждение их на металлическую поверхность под действием падающего потока
13	Диссоциация молекул диффузанта в результате удара о поверхность, образование атомами диффузанта вместе с атомами поверхности диффундидов на поверхности
14	Рекомбинация молекулярных ионов диффузанта при столкновении с поверхностью, диссоциация молекул на атомы, образование атомами диффузанта и металла молекул диффундидов



15	Ионизация молекулы диффузанта, которая находится в адсорбционном монослое, в результате удара частицами падающего потока, рекомбинация иона поверхностным электроном, диссоциация молекул на атомы, образование атомами диффузанта и металла молекул диффундидов
16	Адсорбция молекул поверхностью
17	Адсорбция атомов поверхностью
18	Упругое отражение частиц падающего потока поверхностью, вторичная бомбардировка со всеми последующими энергетически возможными процессами
19	Ударная имплантация частиц газа и поверхностных атомов в глубину поверхности
20	Резонансная перезарядка между молекулами диффузанта и атомами металла с последующей диссоциативной рекомбинацией, диффузия атомов диффузанта в глубину поверхности, образование диффундидов
21	Резонансная перезарядка между ионами и частицами газовой среды, формирование нейтральной составляющей падающего потока
22	Возбуждение и гашение частиц газовой среды с излучением фотонов
23	Рекомбинация молекулярных ионов с диссоциацией молекулы, возможной ступенчатой или ударной ионизацией атомов
24	Рекомбинация ионов
25	Ионизация частиц газовой среды
26	Десорбция под влиянием ударного действия падающего потока
27	Тепловая десорбция

Следствием изложенных в настоящей главе результатов исследований является разработка аналитической модели формирования падающего потока как совокупности подпроцессов, имеющих место в ОКП. Приемлемость этой модели доказана путем сопоставления расчетных данных и результатов экспериментальных исследований реальных газоразрядных процессов на промышленных установках. В свою очередь модель формирования падающего потока положена в основу расчета энергетического спектра падающего потока, последующего его анализа с точки зрения управляемости ВДРТ с целью прогнозирования и получения определенных заданных результатов модификации поверхности. Система критериальных оценок производящей способности

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде* ионизированной газовой среды предназначена для оптимизации параметров технологического процесса, в том числе и факторам минимизации расходования энергетических ресурсов. Вопросы практического применения ВДГРТ для модификации поверхности металлических изделий в аспекте технологических особенностей, применяемого оборудования и организационно-экономических подходов изложены в последующих главах.

### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Пастух І. М. Кінетика прикатодних процесів як фактор формування енергетичного спектру падаючого потоку. – Хмельницький: Вісник ТУП;- 2004;- №1; С. 53-64.
2. Пастух І. М. Теоретичні положення енергетичного спектру падаючого потоку в газорозрядних дифузійних технологіях. – Хмельницький: Вісник ТУП;- 2004;- №5; С. 19-35.
3. Пастух І. М. Енергетичний спектр падаючого потоку при азотуванні в тліючому розряді. - Хмельницький: Вісник ТУП;- 2005;- №5; Ч. 1, т. 1. С. 5-15.
4. Плешивцев Н. В. Катодное распыление. – М.: Атомиздат, 1968. – 339 с.
5. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. – М.: Наука, 1969. – 391 с.
6. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
7. Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов. – М.: Наука, 1980. – 416 с.
8. Горяинов В. Т., Журавлев А. Г., Тихонов В. И. Примеры и задачи по статистической радиотехнике. – М.: Советское радио, 1970. – 597 с.
9. Пастух І. М. Методика обробки даних багатофакторних моделей. – Хмельницький: Вісник ТУП;- 2002;- №6; С. 42-46.
10. Пастух І. М. Особливості технології моделювання багатофакторних залежностей – Хмельницький: Проблеми трибології, 2004, №1
11. Герасимов и др. Курс физической химии. – М.: Химия, 1970, т.1 – 592 с., 1973, т.2. – 623 с.
12. Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности. М.: Мир, 1989. – 564 с.
13. Справочник химика/ 2-е изд. Л.-М.: Госхимиздат, 1962, т. 1. – 1071 с.
14. Пастух І. М., Здибель О. С. Проблематика моделювання процесу азотування в тліючому розряді. - Хмельницький: Вісник ТУП;- 2005;- №1; С. 7-11.

15. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Азотирование стали. М.: Машиностроение, 1976. 256 с.
16. Лахтин Ю. М., Крымский Ю. Н. Физические процессы при ионном азотировании// В кн.: Защитные покрытия на металлах, Киев: Наукова думка, 1968. Вып. 2. С. 225-229.
17. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Шпис Г-Й., Бемер З. Теория и технология азотирования. М.: Metallurgiya. 1991. 320 с.
18. Kolbel J. Die Nitridschichtbildung beider Glimmnitrierung//Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. 1965. №1555. S. 1-19.
19. Keller K. Jonnitriren steuerbare Oberflächenverfestigung durch Jonnitriren//Technische Rundschau. 1971. Bd. 63. № 37, S. 33-39.
20. Edenhofer B. Physikalische und metallkundliche Vorgänge beim Nitriren in Plasma einer Glimmentladung// Harterei-Technische Mitteilungen. 1974. Bd. 29. №2. S. 105-112.
21. Ионная химико-термическая обработка сплавов/ Б. Н. Арзамасов, А. Г. Брагухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти.- М.: Изд-во МГТУ им Баумана, 1999.- 400 с.
22. Смирнов Б. М. Физика слабоионизированного газа. -М.: Наука, 1978.- 416 с.
23. Свойства неорганических соединений/ Справочник. Л.: Химия, 1983, 390 с.
24. Елецкий А. В., Палкин Л. А., Смирнов Б. М. Явления переноса в слабоионизированной плазме. М.: Атомиздат, 1975, 336 с.
25. Яблонский А. А. Курс теоретической механики. – М.: Высшая школа. 1971, т. 2, 487 с.
26. Пастух І. М. Взаємодія падаючого потоку з поверхнею при модифікації в тліючому розряді. - Хмельницький: Вісник ТУП;- 2005;- №6, т. 1; С. 185-194.
27. Пастух І. М. Модифікація металів з використанням азотування в тліючому розряді: стан і перспективи. - Проблеми трибології, Хмельницький, 2004, №3-4, С. 42-55.

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА**

### **2.1 Управляемость технологического процесса**

#### **2.1.1. Введение в систему параметров управляемости**

Принцип управляемости, составляющий главное достоинство ВДГРТ требует обоснования методологических концептуальных взглядов на эту проблему. Для оценки степени управляемости того или иного процесса необходимо создание определенной системы показателей и механизма их обработки с тем, чтобы затем применить их для объективного анализа технологии.

Практически любой технологический процесс качественного изменения состояния объекта обработки, если рассматривать его с точки зрения эффективности и результативности, может оцениваться путем сопоставления реальных  $r_i$  и базовых  $R_i$  показателей. При этом очень важно для большей объективности анализа результативности процесса составить такую систему параметров, в которой минимизировались бы явления взаимного наложения, не позволяющие четко отслеживать функции коррекции исходных параметров влияния на конечный результат, иными словами - структура взаимосвязей должна быть, по возможности, разложена на простейшие, поддающиеся индивидуальной идентификации связи, что в свою очередь создает предпосылки к формированию модели управления. Исходя из такого положения введем некоторые определения. Критериально ориентированная оценка (КОО) представляется как количественный показатель результата технологического процесса минимально возможной взаимной подчиненности, комплексности, сложности, входимости и т.п. Например, фазовый состав покрытия может оцениваться системой КОО, каждая из которых количественно отражает содержание той или иной компоненты покрытия. Если какое либо явление не может характеризоваться непосредственно количественным параметром, то подобные качественные соотношения должны быть переведены в количественную балльную систему оценок, например, хрупкость покрытия при невозможности или сложности оценки ее непосредственным показателем (модулем упругости, пределом текучести и т.п., определяемыми применительно к покрытию) должна быть оценена по шкале количественных баллов, но не других градаций, не подлежащих дальнейшей математической обработке

(буквенная или другая знаковая шкала и т.п.). Принцип же критериальной ориентированности указывает на условие наименьшей взаимной подчиненности показателей, то есть в том же примере с фазовым составом нежелательно вводить комплексный показатель, а лучше разложить его на несколько элементарных.

Выше уже указывалось на то, что КОО могут соответствовать различным стадиям процесса. Идеальная КОО  $R_0$  есть лучший показатель по определенному критерию, обеспечивающий в заданных условиях эксплуатации наибольшую работоспособность объекта обработки. Базовая (прогнозная) КОО  $R_i$  отличается от идеальной тем, что она учитывает неизбежное несоответствие технологического режима тому, который обеспечивал бы идеальное КОО. Реальная КОО  $r_i$  отражает отклонение реального процесса от заданного параметрами технологического режима. Система количественных показателей КОО выбирается такой, что бы сохранялась единая методология обработки оценок. Это требование обеспечивается единообразием соотношений КОО, из которых наиболее приемлемо  $R_0 > R_i > r_i$ . В этом случае соотношение КОО всегда будет меньше единицы. Исходя из такого положения базовые и реальные КОО определяются

$$\begin{aligned} r_i &= R_i + \phi(\delta_i) = R_i + \delta \\ R_i &= R_0 + \Phi(\Delta_i) = R_0 + \Delta \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\phi(\delta_i)$ - корректирующая функция влияния отклонения технологического параметра  $\delta_i$  на реальную КОО,

$\Phi(\Delta_i)$ - то же, для базовой (прогнозной) КОО,  $\delta$ ,  $\Delta$ - полные коррекции реальной и базовой (прогнозной) КОО соответственно.

Для сопоставления КОО введем коэффициент результативности реализаций  $K_p$  (КРР). Само сопоставление можно проводить одним из трех методов: суммарным, когда КРР рассчитывается как сумма отношений реальных и базовых КОО; суммарно-дифференциальным, в этом случае КРР представляется как отношение сумм соответствующих КОО; дифференциальным, при котором КРР - произведение отношений КОО. Проанализируем указанные методы по критерию объективности отображения результативности технологического процесса, введя обозначения:  $K_p$ - начальное значение КРР,  $K_p^I$ - значение КРР после изменения параметров  $r_V$  и  $R_V$ , влияющих на изменение КОО, на величину  $a$ .

Для суммарного метода

$$K_p = \sum_1^i \frac{r_i}{R_i} = \frac{1}{\prod_1^i R_i} \sum_1^i \frac{\prod_1^i R_i}{R_i} r_i \quad (2)$$

Аналогично

$$K_p^I = \sum_1^i \frac{r_i}{R_i} - \frac{r_V}{R_V} + \frac{r_V + a}{R_V} = K_p + \frac{a}{R_V} \quad (3)$$

Относительное изменение KPP

$$\frac{K_p^I}{K_p} = 1 + \frac{a}{K_p R_V} \quad (4)$$

Для суммарно-дифференциального метода

$$K_p = \frac{\sum_1^i r_i}{\sum_1^i R_i}; \quad K_p^I = K_p + \frac{a}{\sum_1^i R_i}; \quad \frac{K_p^I}{K_p} = 1 + \frac{a}{K_p \sum_1^i R_i} \quad (5,6,7),$$

откуда следует вывод о наиболее существенном недостатке метода - изменение KPP не учитывает какая КОО изменяется, то есть несоразмерное изменение одной КОО, возможно не самой существенной, может создать иллюзию радикальной коррекции технологического процесса.

В случае дифференциального метода

$$K_p = \prod_1^i \frac{r_i}{R_i} = \frac{\prod_1^i r_i}{\prod_1^i R_i}; \quad K_p^I = \frac{r_1}{R_1} \frac{r_2}{R_2} \dots \frac{r_V + a}{R_V} \dots \frac{r_i}{R_i} = \frac{\prod_1^i r_i (1+a)}{\prod_1^i R_i} = K_p (1 + K_a); \quad (8,9,10),$$

$$\frac{K_p^I}{K_p} = 1 + K_a = 1 + \frac{a}{r_V}$$

то есть относительное изменение учитывает, какая конкретно КОО изменяется.

Например, для рядов  $r_i$  10,20,30 и  $R_i$  20,40,60 при  $a=10$  в случае, если изменяется наименьший и наибольший члены ряда соответственно максимальный и минимальный коэффициенты  $K_{P\ MAX}^I$ ,  $K_{P\ MIN}^I$ , а также их соотношение  $K_{P\ MAX}^I / K_{P\ MIN}^I$  для суммарного метода равны 2; 1,67 и 1,197, суммарно-дифференциального- 0,585 и не зависят от того, какая оценка изменяется, для дифференциального- 0,25; 0,167 и 1,497. Эти данные подтверждают большую объективность и эффективность дифференциального метода.

Дальнейший анализ методов удобно проводить в предположении, что все КОО равны средневзвешенным соответственно  $r$  и  $R$ , причем  $r/R=p$ . Тогда для суммарного метода

$$K_p = i \frac{r}{R} = ip; \quad \frac{K_p'}{K_p} = 1 + \frac{a}{ipR} \quad (11,12),$$

для суммарно-дифференциального

$$K_p = \frac{ir}{iR} = \frac{ipR}{iR} = p; \quad \frac{K_p'}{K_p} = 1 + \frac{a}{piR} \quad (13,14),$$

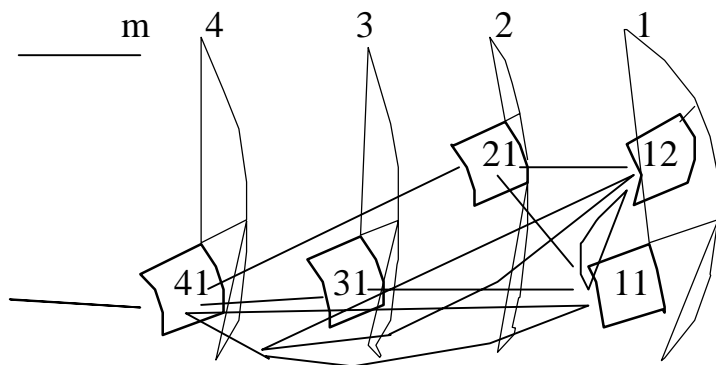
для дифференциального метода

$$K_p = p^i; \quad \frac{K_p'}{K_p} = 1 + \frac{a}{pR} \quad (15,16)$$

Таким образом, с учетом также изложенного в анализе формул (2...10) дифференциальный метод предпочтительнее, так как относительное изменение КРР не зависит от количества КОО, что предопределяет большую объективность этого метода.

Формулирование принципа определения величины полной коррекции  $\delta$  и  $\Delta$  (1) возможен путем анализа видов взаимосвязи отдельных факторов модели управления технологическим

*Оболочки влияния*



*Рис.2.1. Типовой граф модели взаимосвязей процесса*  
 процессом. Типичный элемент графа такой модели показан на рис. 2.1. Группирование КОО при этом осуществляется по критерию общности типов взаимосвязи, которые могут быть на уровне прямого, косвенного влияния или взаимовлияния. Уровень прямого влияния соответствует таким связям, когда изменение одного параметра изменяет однозначно, непосредственно КОО. Уровню косвенного влияния отвечают такие взаимосвязи, когда изменение КОО возможно только посредством промежуточного (промежуточных) параметров. Наконец, для уровня взаимовлияния характерна ситуация, когда изменение КОО проходит раздельно, но работоспособность объекта в целом предопределяется комбинацией значений КОО. Так для графа на рис. 2.1 взаимосвязи 41-11, 41-12-

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
 прямого уровня, 41-21-11, 41-31-11, 41-21-12- косвенного, а 11-12- на уровне взаимовлияния, примером которого может служить содержание различных компонентов фазового состава покрытия и т.п.

Условимся обозначать через  $f_n(a_n)$  и  $F_n(A_n)$  корректирующие функции влияния на реальную и базовую КОО соответственно изменения параметров  $a$  и  $A$  связей прямого влияния, количество которых  $n$ ; посредством  $v_{kM}(b_k)$  и  $V_{kM}(B_k)$  – то же для связей косвенного влияния, количество которых  $k$ , причем в каждом из них может быть соответствующее число оболочек влияния  $m_k$ ; с помощью  $s_z(c_z)$  и  $S_z(C_z)$  - аналогичные корректирующие функции для  $z$  связей типа взаимовлияния. Тогда полная величина коррекции реальной КОО определяется

$$\begin{aligned} \delta = & f_1(a_1) + f_2(a_2) + \dots + f_n(a_n) + v_{11}(v_{12}(v_{13}(\dots(v_{1m_1}(b_1)\dots))) + v_{21}(v_{22}(\dots(v_{2m_2}(b_2)\dots))) + \quad (17) \\ & + \dots + v_{k1}(v_{k2}(\dots(v_{km_k}(b_k)\dots))) + s_1(c_1) + s_2(c_2) + \dots + s_z(c_z) = \sum_1^n f_n(a_n) + \\ & + \sum_1^k v_{k1}(v_{k2}(\dots(v_{km_k}(b_k)\dots))) + \sum_1^z s_z(c_z) \end{aligned}$$

Аналогично полная величина коррекции базовой (прогнозной) КОО

$$A = \sum_1^n F_n(A_n) + \sum_1^k V_{k1}(V_{k2}(\dots(V_{km_k}(B_k)\dots))) + \sum_1^z S_z(C_z) \quad (18)$$

Таким образом, сформулированная выше концепция управляемости ВДГРТ может быть применена для формирования модели системы управления с целью эффективного ее применения.

### **2.1.2. Структура и взаимосвязь компонентов модели управления ВДГРТ модификации поверхности**

Среди известных и практически используемых методов модификации поверхности ВДГРТ отличаются общепризнанной хорошей управляемостью, суть которой и состоит в обеспечении возможности программировать конечные результаты обработки изделий соответственно условиям их эксплуатации. Для реализации подобного принципа необходимо создать модель управления процессом. При этом в идеале имеется в виду не только отслеживание, регистрация и поддержка требуемых параметров технологического режима, но и автоматический их выбор, программный выход на них в зависимости от начальных условий, возможных текущих факторов влияния и требуемых конечных результатов процесса.



В связи с тем, что модель управления ВДГРТ многофакторная и многозадачная как по количеству исходных показателей, так и результатов обработки, то теоретически она представляется в виде многомерной системы, геометрическая интерпретация которой проблематична прежде всего с позиций наглядности. В этой связи более приемлем принцип разложения ее на отдельные алгоритмические структуры, соответствующие компонентам по объектно-функциональному признаку дифференциации составляющих. К числу таких компонентов отнесены (в скобках – сокращенное обозначение на схемах):

1. Объект обработки (1.Изделие);
- 2.Устройство для реализации ВДГРТ (2.Устройство), в т.ч. приспособление для закрепления Изделия (Приспособление);
- 3.Параметры технологического режима (3.Режим);
- 4.Конечные результаты упрочнения (4.Результаты).

Для сокращения приняты обозначения: поверхностный слой изделия, в котором в процессе модификации произошли фазовые структурные превращения, - диффузионный слой (ДС), рабочая газовая среда - РГС; применительно к Устройству принят выбор направлений отсчета: осевое – совпадает с продольной осью разрядной камеры (для цилиндрических камер – это ось цилиндра); диаметрально – в плоскости, которая перпендикулярна к оси

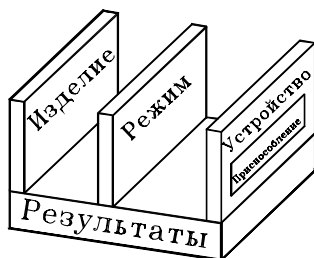
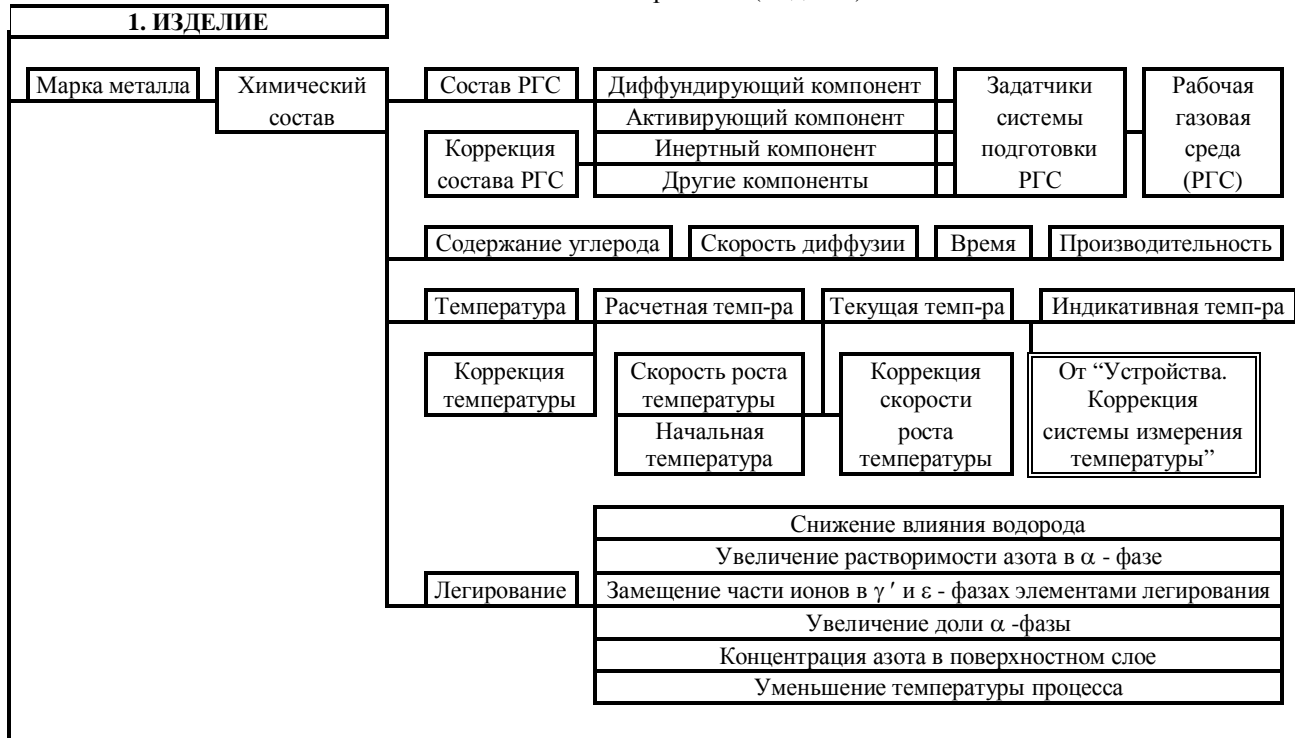


Рис. 2.2. Соотношение компонентов комплекса управления

камеры, сокращение **extr** – указывает на наличие экстремальной зависимости между компонентами схемы, двойной рамкой выделены адреса взаимосвязей внутри компонента или с другими компонентами. Соотношение компонентов комплекса управления ВДГРТ показаны на рис. 2.2. Ниже приведены схемы компонентов системы управления ВДГРТ.

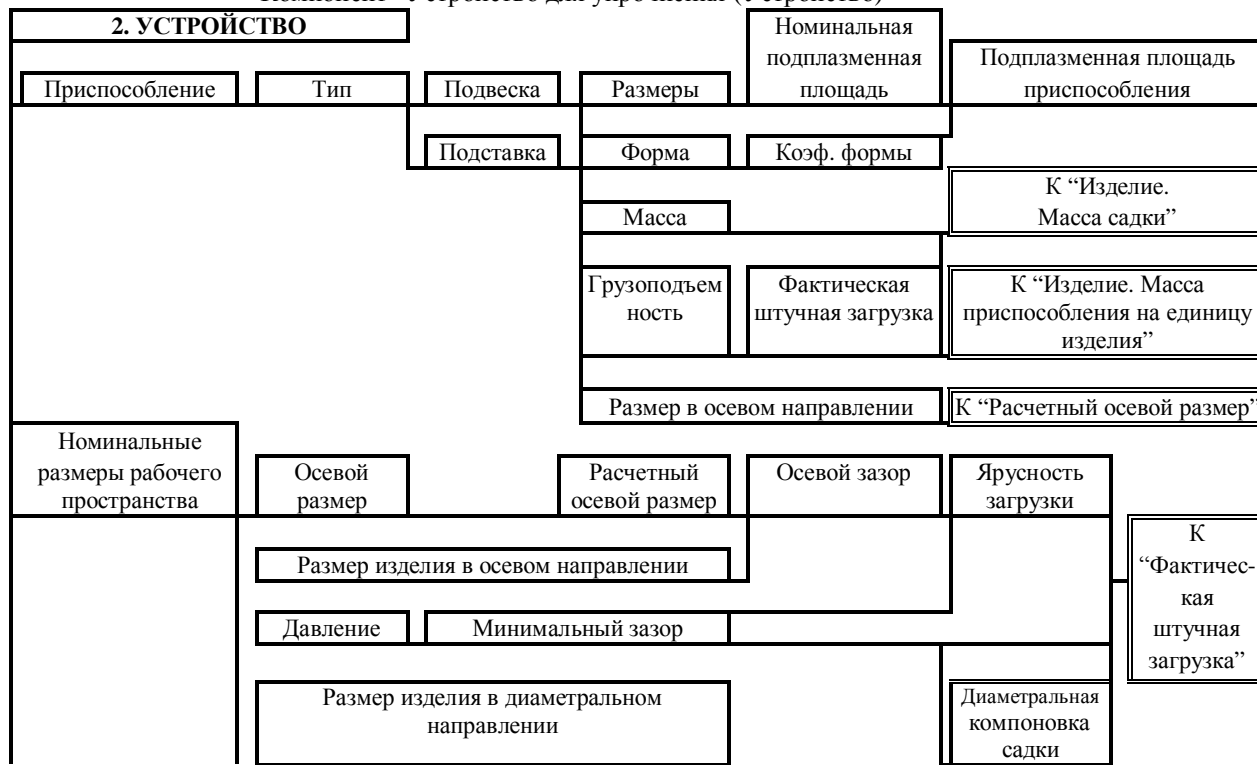
## Компонент “Объект обработки (Изделие)”







Компонент “Устройство для упрочнения (Устройство)”





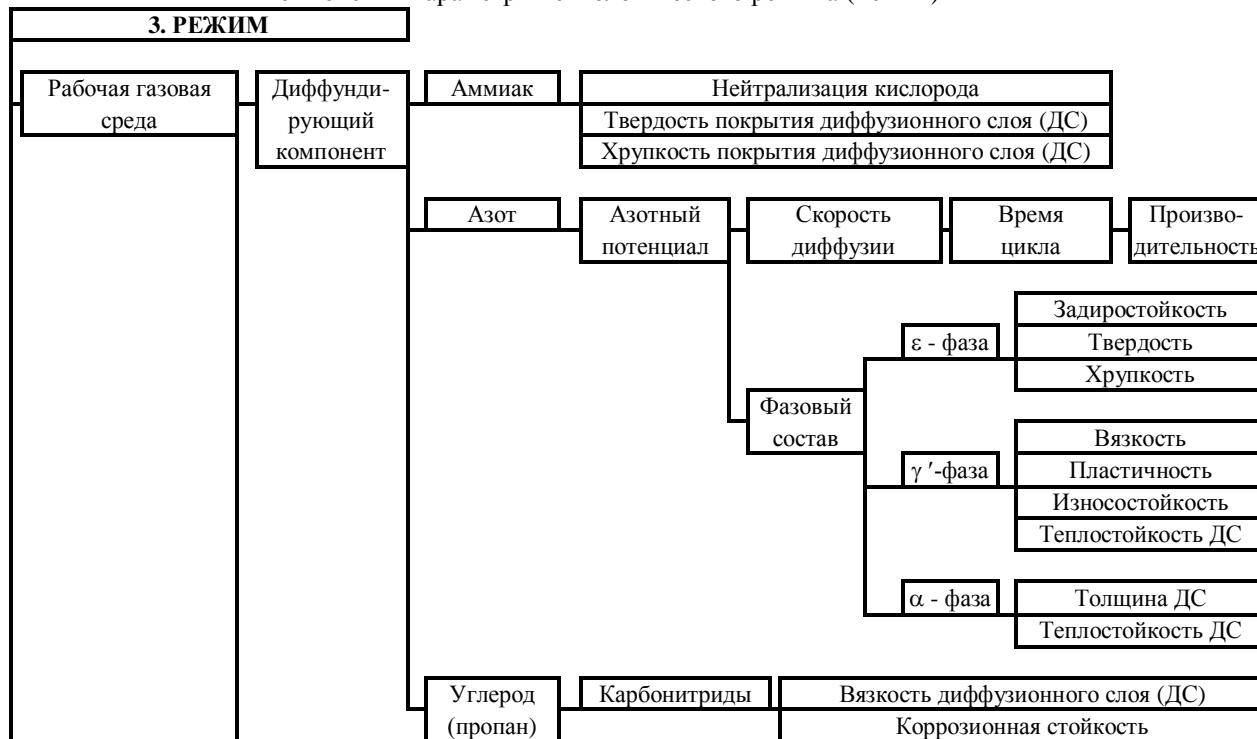


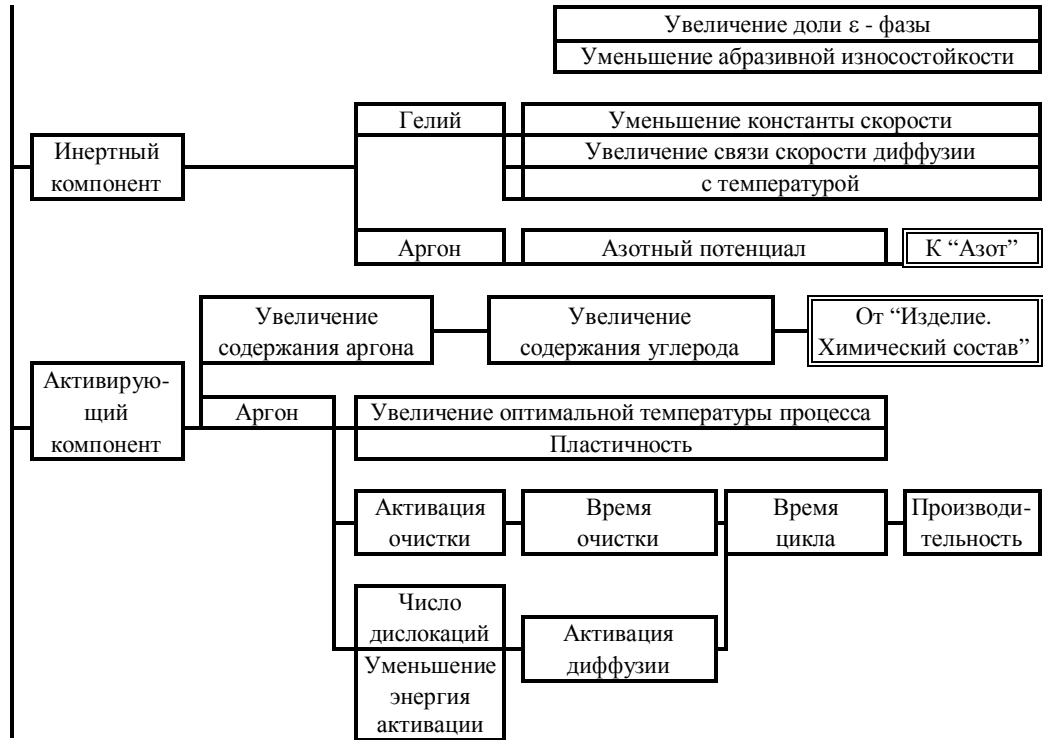
Глава 2. Технологические особенности процесса



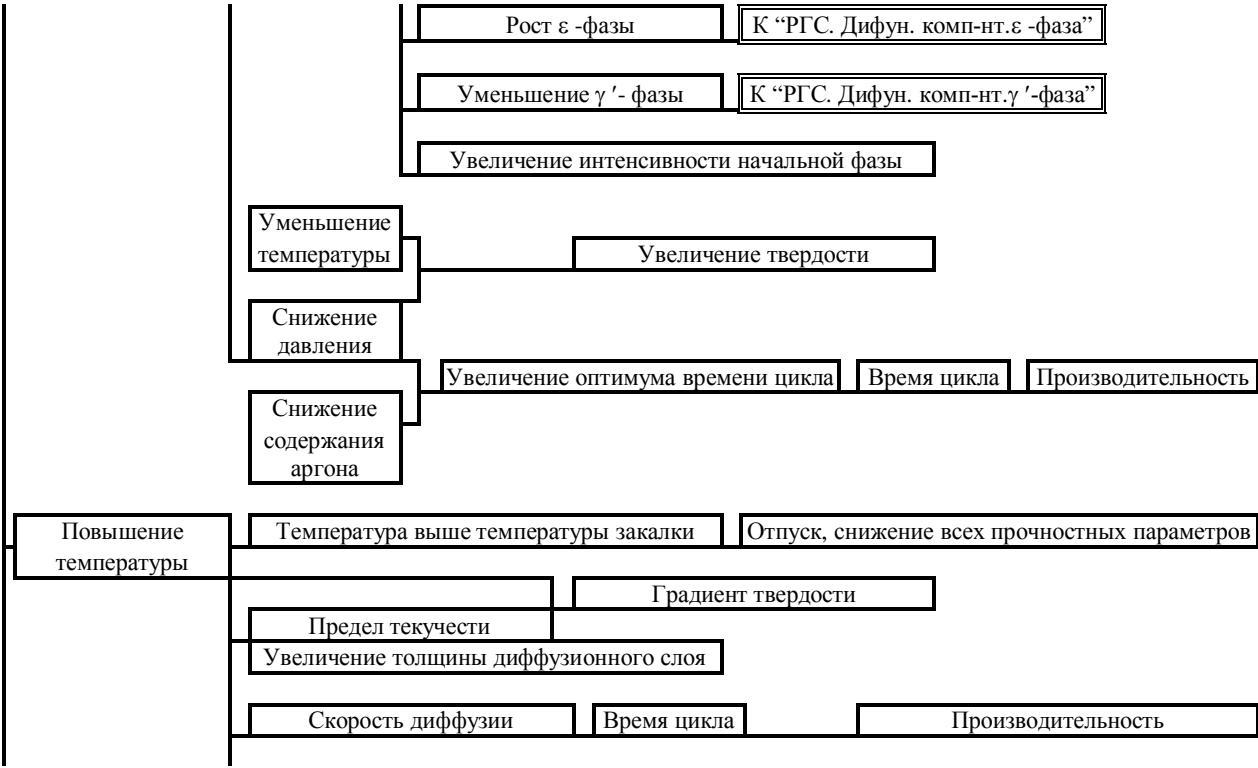


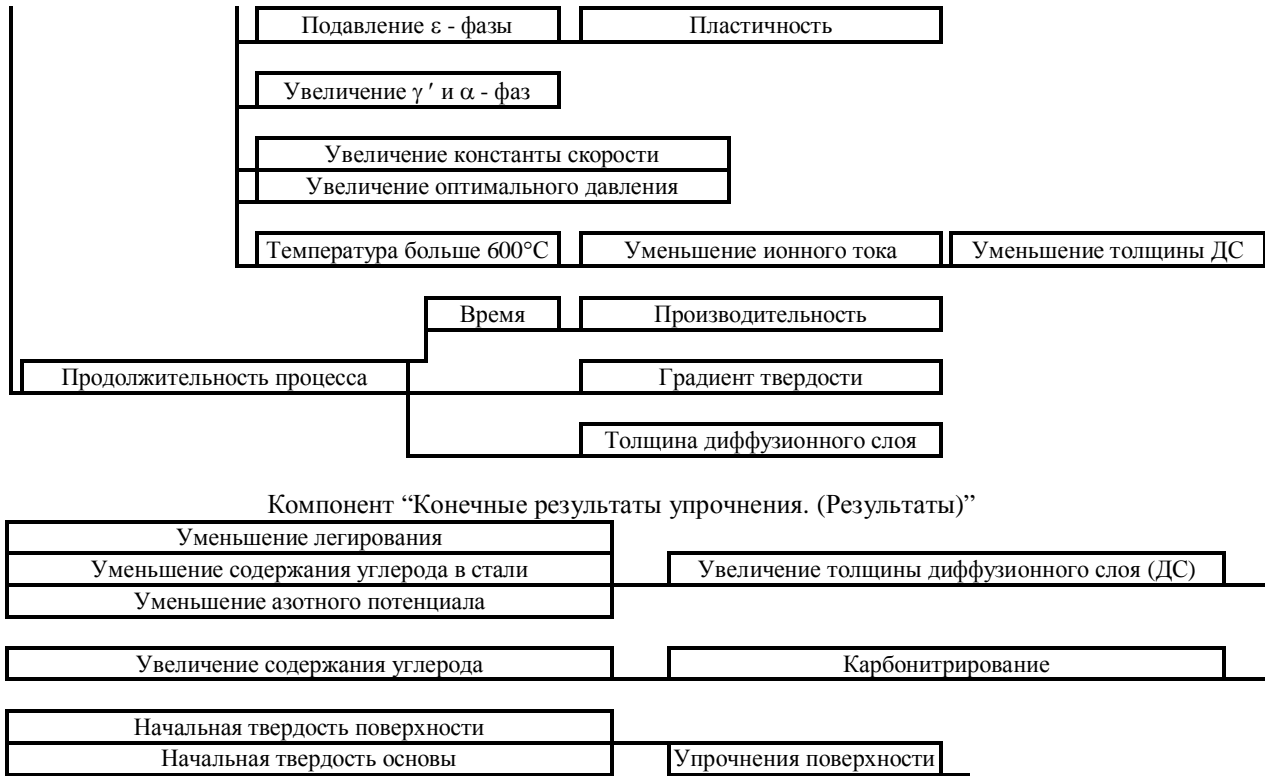
Компонент “Параметры технологического режима (Режим)”

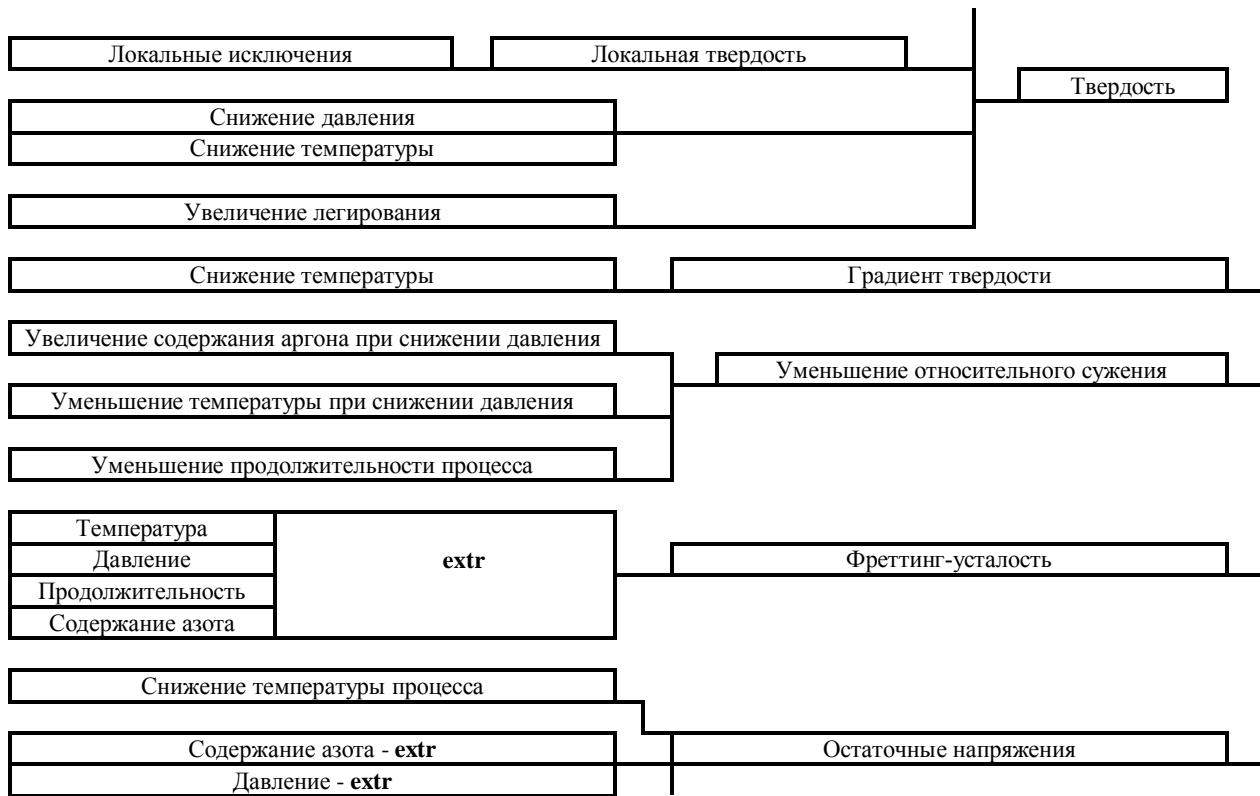


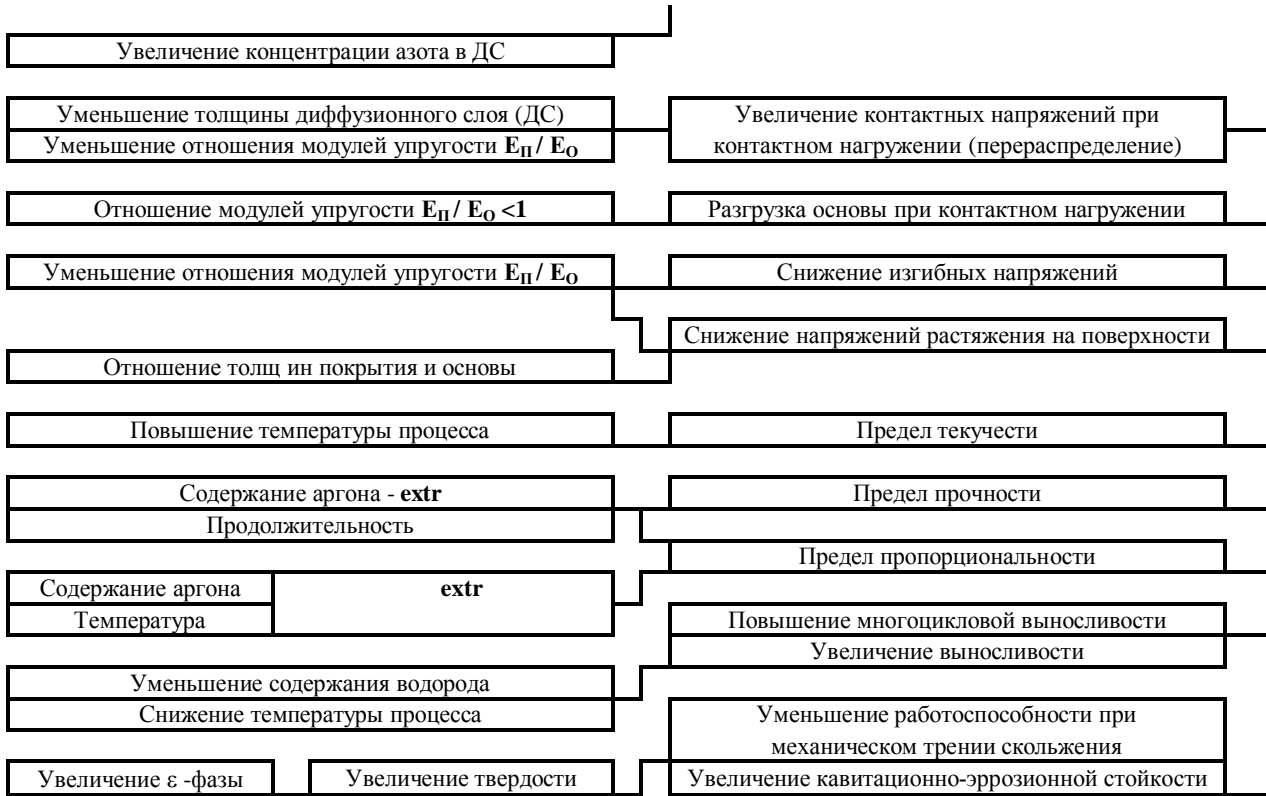




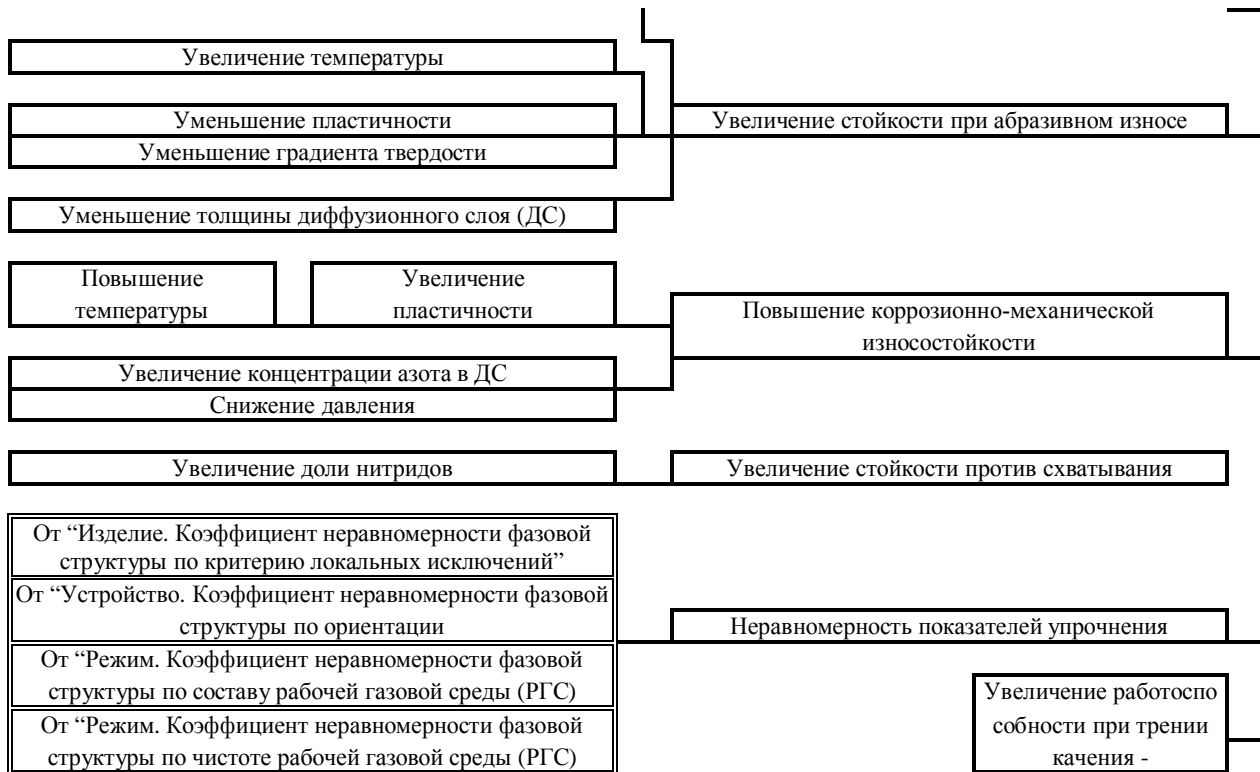




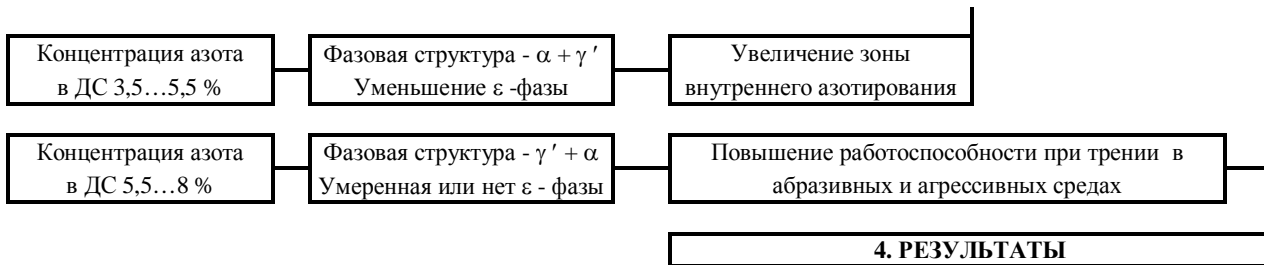




Табла 2. Технологические особенности процесса





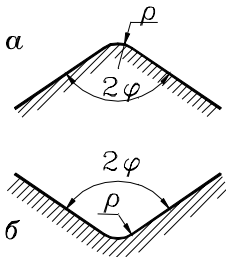


Представленная модель выполнена на основании результатов исследований, проведенных на промышленных установках, сводная база данных технологических режимов приведена ниже. К числу данных технологического режима относятся: температура поверхности обрабатываемого объекта; плотность тока с учетом также неравномерности поля, вызванной локальными исключениями поверхности (острые ребра, узкие пазы, отверстия, особенно малого диаметра), контролируемая величиной общего тока; напряжение на электродах разрядной камеры, состав газовой среды и ее давление. Все названные параметры взаимосвязаны, как это было показано в главе 1, например давление газовой среды выбирается не только по критерию формирования определенного фазового состава поверхности, температуры поверхности, плотности тока, но также и возможности зажигания и поддержания тлеющего аномального разряда.

## **2.2 Влияние локальных исключений на поверхности**

Условия проведения модификации поверхности с применением ВДГРТ для превосходящей части ее отвечают модели одномерного поля, которая рассмотрена в главе 1 [1]. Однако практически на каждой поверхности существуют локальные исключения в виде ребер, пазов, отверстий и т.п., которые существенно изменяют конфигурацию поля и, таким образом - потоки частиц, как эмитирующего, так и падающего. Следствием такого видоизменения потоков прежде всего является локализация энергетики процессов бомбардировки поверхности, локальное превышение температуры поверхности над средними значениями, деформация динамики нагревания ее и, как конечный отрицательный результат - отпуск поверхностных и близлежащих к ним слоев. Таким образом, если не учитывать влияние локальных исключений, то результаты применения ВДГРТ могут быть несоответствующими запланированным вплоть до диаметрально противоположных, вместо, например, укрепления рабочих режущих кромок инструмента твердость их может даже снизиться к значениям, меньшим начальным. Работы по изучению концентраций полей в основном относятся к теории зондов или к прикладным задачам, где имеет существенное значение автоэлектронная эмиссия [2]. С этой точки зрения изложенные ниже подходы имеют актуальное практическое значение.

Все локальные исключения поверхности относительно ВДГРТ могут в самом общем случае классифицироваться на две группы: внешние (выступы) и внутренние (впадины), типичная схема конструкции которых показана на рис. 2.3. Частными случаями могут быть тонкие выступающие пластины, пазы с параллельными стенками, отверстия и т.п..



*Рис. 2.3. Виды локальных исключений поверхности.  
а – внешние, б - внутренние*

Рассмотрим методику решения задач локальных исключений первой группы как более сложных. Расчетная схема ситуации демонстрируется рис.2.4. Условно расположим анод в направлении биссектрисы угла заострения ребра, поскольку несимметричное расположение электродов один относительно другого не изменяет сути явления

(увеличение потока со стороны одной грани соответствует уменьшению его с противоположной. Установлено, что положительно заряженные частицы (ионы) движутся вдоль силовых линий [3], поэтому они могут быть индикатором последних.

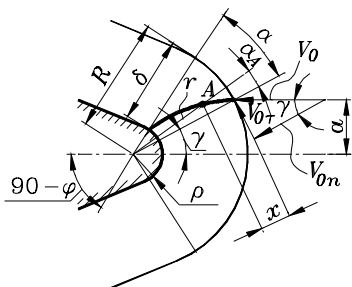


Рис. 2.4. Схема внешнего локального исключения поверхности

Равномерно распределенные в плоскости, перпендикулярной общему вектору поля, силовые линии, в ОКП, прилегающей к ребру изменяют свою конфигурацию, уплотняясь на закруглении, радиус которого  $\rho$ . В первом приближении концентрация поля определяется как отношение плотности силовых линий на границе области катодного падения к аналогичному показателю на поверхности закругления ребра. Ширина зоны  $a$ , из которой силовые линии попадают на

поверхность закругления, может быть установлена, исходя из уже отмеченной выше тезиса о движении ионов вдоль силовых линий. Предельная траектория, на которой в произвольный момент времени находится частица  $A$ , показана на рис. 2.4 утолщенной кривой. Частица  $A$  входит в ОКП, ширина которой  $\delta$ , в принципе под произвольным углом, но учитывая, что ионы - частицы, масса которых значительно превышает массу электронов как контрчастиц столкновений, мало изменяют свое направление движения, поэтому будем считать направление их входа в ОКП совпадающим с генеральным направлением поля, т.е. - вдоль биссектрисы угла заострения ребра. Вектор начальной скорости входа частицы в ОКП может быть разложен на нормальное и тангенциальное направления относительно радиуса начального положения, соединяющего точку входа в ОКП с центром закругления. В дальнейшем ион движется по криволинейной траектории, ускоряясь под действием поля в радиальном направлении и поворачиваясь относительно центра дуги под действием тангенциальной составляющей скорости.

План скоростей для произвольного положения частицы  $A$  показан на рис. 2.5. Вектор скорости в радиальном направлении

$$V_n = V_E + V_{n0n} - V_{n0\tau}, \quad (1)$$

где  $V_E$  – скорость частицы как следствие действия поля,

$V_{n0n}$ ,  $V_{n0\tau}$  - проекции радиальной и тангенциальной составляющих начальной скорости на текущие радиальные и тангенциальные направления движения частицы.

$$V_{n0n} = V_{0n} \cos \alpha_A = V_0 \cos \gamma \cos \alpha_A \quad (2)$$

$$V_{n0\tau} = V_{0\tau} \sin \alpha_A = V_0 \sin \gamma \sin \alpha_A \quad (3)$$

Составляющие полной скорости

$$V_n = V_E + V_{n0n} - V_{n0\tau} \quad (4)$$

$$V_\tau = V_{\tau0\tau} + V_{\tau0n} \quad (5)$$

Движение частицы в результате действия поля рассматривается как движение под действием силы, зависящей от положения точки. Для этого выбрана система координат с началом на границе ОКП, ось  $x$  направлена вдоль радиуса к поверхности (рис. 2.6). Напряженность поля изменяется по линейному закону, причем на границе ОКП она равна нулю [1]. Сила, действующая на частицу

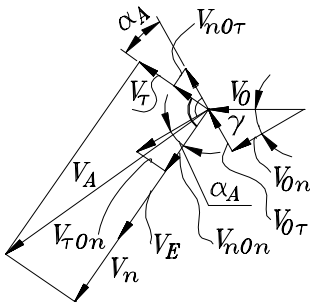


Рис. 2.5. План скоростей для произвольного положения подвижной частицы

$$F(x) = q_e E(x), \quad (6)$$

где  $q_e$  – заряд электрона (имеется в виду, что ионы в процессах ВДГРТ - практически все однозарядные),

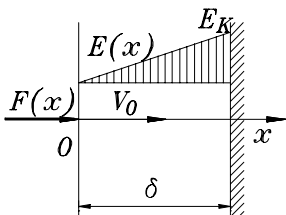
$E(x)$  – закон изменения напряженности поля,

$$E(x) = E_K \frac{x}{\delta}, \quad (9)$$

где  $E_K$  – напряженность поля возле катода.

Тогда

$$F(x) = q_e E_K \frac{x}{\delta} = C_F x, \quad (10)$$



ис. 2.6. Расчетная схема определения скорости частицы

где  $C_F = \frac{q_e E_K}{\delta}$  (кг·с<sup>-2</sup>)

Уравнение движения частицы под действием силы

$$m \frac{dV}{dt} = \sum X_i = F(x) = C_F x, \quad (11)$$

где  $m$  – масса частицы.

После преобразований  $\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{dV}{dx} V$  и разделения переменных уравнение (11) примет вид

$$mV \frac{dV}{dx} = C_F x, \quad mVdV = C_F x dx \quad (12)$$

Интегрирование дает возможность определить закон изменения скорости движения в радиальном направлении

$$\begin{aligned} m \int_{V_0}^V V dV = C_F \int_{x_0}^x x dx; \quad \frac{mV^2}{2} \Big|_{V_0}^V = C_F \frac{x}{2} \Big|_{x_0}^x; \\ \frac{mV^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2} = \frac{C_F}{2} (x^2 - x_0^2) \end{aligned} \quad (13)$$

При начальной координате  $x_0=0$

$$V(x) = \sqrt{V_0^2 + \frac{C_F x^2}{m}} = \sqrt{V_0^2 + C^2 x^2}, \quad (14)$$

где введено обозначения  $C = \sqrt{C_F/m}$  ( $c^{-1}$ )

Для определения закона движения частицы после преобразования уравнения (14) в вид  $\frac{dx}{dt} = \sqrt{V_0^2 + C^2 x^2}$ , разделении переменных и интегрирования (при  $t_0=0$ )

$$\int_0^x \frac{dx}{\sqrt{V_0^2 + C^2 x^2}} = \frac{1}{C} \ln \left( x + \sqrt{\frac{V_0^2}{C^2} + x^2} \right) = \int_0^t dt = t \quad (15)$$

С целью упрощения выражения (15) проанализируем соотношение начальной скорости частицы к ее скорости во время движения в ОКП. Энергия в момент вхождения частицы в ОКП соответствует энергии  $\varepsilon_0 = \frac{mV_0^2}{2}$ , а энергия возле катода

$\varepsilon_K = q_e U_K = \frac{mV_K^2}{2}$ . Тогда отношение скоростей  $K_V = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_K}}$ . При

типичных режимах модификации: катодном падении напряжения  $U_K=500$  В, температуре газа  $T= 600^\circ\text{C} = 873$  К= $873/11610=0,075$  эВ  $K_V=0,012=1,2$  %. Таким образом, допустимо не учитывать радиальную составляющую начальной скорости. Тогда при  $V_0=0$

$$\frac{dx}{dt} = Cx; \quad x = e^{Ct} \quad (16)$$

Угловая скорость вращения радиальной направляющей, по которой движется частица

$$\omega = \frac{V_\tau}{r} = \frac{V_\tau}{R-x} = \frac{V_\tau}{R-e^{Ct}} \quad (17)$$

Из формулы (5)

$$V_\tau = V_0 (\cos \gamma \cdot \sin \alpha_A + \sin \gamma \cdot \cos \alpha_A), \quad (18)$$

причем в реальной области углов тригонометрическая функция в скобках изменяется с незначительной амплитудой в пределах 0,84...0,9, т.е. допустима замена  $V_\tau = V_0$ . Тогда закон изменения угла поворота

$$\alpha(t) = \int_0^t \omega \cdot dt = \int_0^t \frac{V_0}{R-x} dt \quad (19)$$

С целью исключения времени подставим из формулы (16)  $dt = dx/Cx$ , тогда уравнение траектории движения частицы

$$\alpha = \frac{V_0}{C} \cdot \int_0^x \frac{dx}{x(R-x)} = \frac{V_0}{RC} \left( \int_0^x \frac{dx}{x} + \int_0^x \frac{dx}{R-x} \right) = \frac{V_0}{RC} \ln \frac{x}{R-x} \quad (20)$$

Начальная скорость может быть определена через температуру газовой компоненты среды аналогично отмеченному выше.

Предельное значение угла  $\alpha$  определяется при  $x = \delta$ , учитывая, что  $R = \delta + \rho$

$$\alpha_K = \frac{V_0}{RC} \ln \frac{\delta}{R-\delta} = \frac{V_0}{(\rho+\delta)C} \ln \frac{\delta}{\rho} \quad (21)$$

Ширина зоны захвата силовых линий

$$2a = 2R \cdot \sin \gamma = 2R \cdot \sin(90 - \varphi - \alpha_K) = 2R \cdot \cos(\varphi + \alpha_K) \quad (22)$$

Коэффициент концентрации поля определяется как отношение ширины зоны захвата силовых линий к длине периметра закругления ребра внешнего локального исключения

$$K_E = \frac{2a}{\rho(\pi - 2\varphi)} \quad (23)$$

Плотность падающего потока

$$j_{II} = K_E (j_+ + j_V), \quad (24)$$

где  $j_+$  - плотность потока ионов, рассчитанная для условий равномерного распределения поля по поверхности,

$j_-$  - аналогично плотность потока быстрых частиц.

Увеличение плотности падающего потока приведет к интенсификации как вторичной электронной эмиссии, так и

термоэлектронной эмиссии, а это в свою очередь - к увеличению плотности потока электронов из катода

$$j_{ек} = K_E(j_{BK} + \xi \cdot j_{TK}), \quad (25)$$

где  $j_{BK}$  – плотность потока вторичной электронной эмиссии с катода, рассчитанная для условий равномерного распределения поля по поверхности,

$j_{TK}$  – аналогично, плотность потока термоэлектронной эмиссии,  $\xi$  - коэффициент, учитывающий увеличение скорости нагревания поверхности в результате интенсификации падающего потока как следствия концентрации поля.

Следует также учесть, что рост концентрации ионов и электронов увеличит рекомбинационные явления и несколько понизит эффективность концентрации поля. Аналитически учесть весь комплекс явлений без чрезмерного осложнения методики расчета маловероятно. Поэтому экспериментальная проверка изложенных выше положений может быть выполнена, если сравнить плотность тока объектов равной площади, но с локальными исключениями поверхности и без них (см. 1.3.2). Если ввести понятие комплексного параметра – эффективного коэффициента концентрации  $K_e$ , который учитывал бы все вышеперечисленные процессы, то полный ток для объекта, имеющего локальные исключения

$$I_K = j_{ec}(K_e A_K + A - A_K), \quad (26)$$

где  $j_{ec}$  – плотность электронного тока на границе ОКП для объекта без локальных исключений, определяемая экспериментально при обработке таких объектов путем регистрации полного тока  $I$ ,  $j_{ec} = I/A$ ,

$A$  – площадь поверхности объекта,

$A_K$  – площадь внешних локальных исключений,

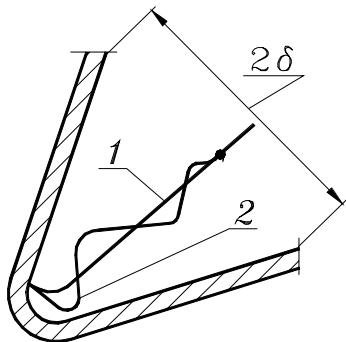
$A_K = \rho(\pi - 2\varphi)L$ ,  $L$  – общая длина внешних однотипных локальных исключений.

Из уравнение (26) экспериментальное значение эффективного коэффициента концентрации поля

$$K_e = \frac{I_K - j_c(A - A_K)}{j_c A_K}, \quad (27)$$

сравнение которого со значением, рассчитанным согласно изложенной выше методике, удовлетворительно соответствует результатам, приведенным в 1.3.2.

Общие подходы к учету внутренних локальных исключений поверхности сводятся к схеме, показанной на рис. 2.7.



*Рис. 2.7. Схема прикатодных процессов во внутреннем локальном исключении*

Электрон, вылетевший с плоского катода, мгновенно ориентируется по вектору поля. Такая же идеальная траектория 1 у него была бы и при катоде с внутренними локальными исключениями, если бы не учитывать следующие обстоятельства. В пазах (клиновидных углублениях) ширина которых не превышает удвоенную ширину ОКП (1.3.1.11), ОКП взаимно перекрываются, что приводит к локальному перегреву этих зон, а в

некоторых случаях такой концентрации поля, при которой разряд переходит в дуговой. По существу подобные условия соответствуют модели с полым катодом, в которой всегда наблюдается резкое увеличение тока разряда. Вероятной причиной подобной аномалии может быть следующее. Электрону теперь уже предстоит траектория 2, он фактически совершает колебательное движение между двумя стенками, постепенно приближаясь к стабильной прямолинейной траектории 1. Естественно, путь электрона по траектории 2 больше, чем по траектории 1, поэтому один и тот же электрон может совершить большее число актов ионизации, чем увеличит как ток ионов, так и эмиссию электронов с катода. Таким образом, методика учета роста тока и концентрации его во внутренних локальных исключениях может базироваться на исследовании колебательного движения электрона в пространстве между двумя стенками катода. Влияние внутренних локальных исключений также описывалось в 1.3.2.

### **2.3 Температура поверхности деталей в процессе ВДГРТ модификации металлов**

Проектирование оборудования для реализации ВДГРТ модификации поверхности металлических деталей предусматривает определение его главных технологических характеристик, прежде всего - производительности и конструктивной схемы установки. Методика этой фазы проектирования детально изложена в главе 4. Для всех вариантов проектной программы (однотипные или разнотипные детали по конструкции, материалу, наличию локальных



исключений на поверхности, требований к конечным результатам обработки и т.п.) объем садки наиболее надежно может определяться компоновкой объектов модификации в пределах рабочего пространства камеры. Отправной точкой для этой операции будет назначение минимального расстояния между отдельными деталями и между деталями и элементами разрядной камеры. Оптимальными будут те расстояния, при которых обеспечивается в регламентированных границах равномерность конечных характеристик по всей поверхности деталей и максимально плотная компоновка деталей в садке. Рекомендации относительно приемлемых расстояний между объектами модификации в специальной литературе по этому вопросу практически отсутствуют [1-39], а те, которые встречаются, имеют довольно неопределенный, приблизительный характер, мало пригодный для практического применения.

Условием допустимости соответствующего расстояния между деталями, а также деталями и анодом, может быть критерий равномерности распределения температуры поверхности деталей, поскольку температура является фактически решающей характеристикой технологического режима модификации, от которой зависят не только энергетические параметры процесса ВДГРТ, но, прежде всего, условия для формирования фазового состава поверхности, что в первую очередь обуславливает конечные результаты обработки. Критерий неравномерности температурного поля на поверхности детали может применяться в таких вариантах:

$$P_E(t_0)/P_E(t_e) \leq [K_{PE}] \quad (1)$$

$$|P_E(t_e) - [P_E]| \leq [\Delta_{PE}] \quad (2)$$

$$t_e \leq [t_{\text{вид}}], \quad (3)$$

где  $P_E$  – эксплуатационный показатель, по которому устанавливаются конечные задачи обработки деталей (твердость поверхности, ее хрупкость, толщина и фазовый состав модифицированного слоя, толщина слоя диффузидов – нитридов, карбидов, боридов и т.п., градиент твердости, коэффициент трения, антикоррозийные свойства и прочие),

$P_E(t)$  – функция зависимости эксплуатационного показателя от температуры обработки поверхности,

$t_0$  – температура зоны поверхности, которая не экранируется поверхностью другой детали, анодом или подвеской (не имеет с ними термического контакта - непосредственного или терморadiационного)

$t_e$  – температура зоны, которая соответственно экранируется,

$[K_{ПЕ}]$  – допустимое значение колебания эксплуатационного показателя,

$[ПЕ]$  – базовое значение эксплуатационного показателя, который устанавливается при проектировании технологического процесса,

$[\Delta_{ПЕ}]$  – допустимое значение отклонения эксплуатационного показателя,

$[t_{omn}]$  – предельное значение температуры отпуска для материала детали с учетом предыдущей термической обработки.

Уже только сам перечень вариантов применения критерия неравномерности температурного поля свидетельствует о решающем значении этого фактора для назначения оптимальных расстояний в садке.

Исследования распределения температурного поля на поверхности деталей в результате собственно термического взаимодействия деталей между собой, деталей с анодом выполнялись по методике, которая предусматривала отсутствие влияния локальных исключений, что составляло предмет прежде выполненных опытов (1.3.2). Поэтому конструкция деталей в направлении взаимного термического контакта не предусматривала подобных исключений, а сами поверхности были цилиндрической формы. Поскольку при близком взаимном расположении деталей возможен эффект полого разряда, то для изучения его влияния применялись детали разного диаметра. Экспериментальные исследования проводились на промышленной установке типа ИПА1512 с размерами рабочего пространства в диаметральном и

осевом

направлениях

соответственно 500 и 1200 мм.

Конструктивная

схема

экспериментальной

системы

показана

на

рис. 2.8.

Экспериментальная

система

смонтирована

внутри

разрядной

камеры

1

как

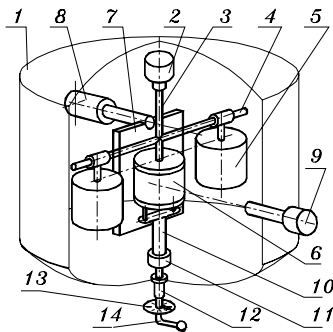
подвеска

к

токовводу

катода

2.



*Рис. 2.8. Схема экспериментальной системы*

нагретом состоянии две контрдетали 5, причем конструкцией предусмотрена возможность перемещения их в радиальном направлении камеры.

Исследовательская деталь 6 установлена на центральном стержне 3 и имеет возможность поворачиваться относительно его оси. Параллельно поперечной штанге

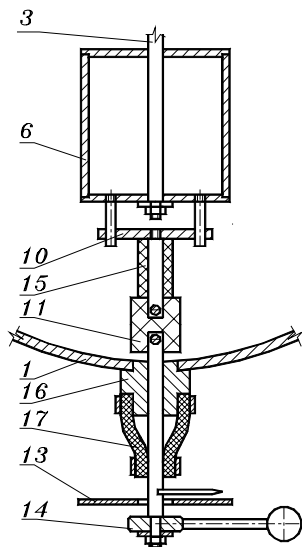


Рис. 2.9. Схема поворотного устройства детали

установлен вертикальный дополнительный анод 7, который с помощью телескопического устройства 8 электрически соединяется с корпусом камеры, служащей анодом. Телескопическое устройство

обеспечивает возможность перемещения дополнительного анода в радиальном направлении. По вертикали исследовательская деталь установлена таким образом, чтобы ее середина совпадала с осью датчика 9 комплекса для измерения температуры АПИР-С. Снизу под исследовательской деталью смонтирована система ее поворота, в состав которой входят поводок 10, изолятор 11,

вакуумный герметический узел 12, лимб отсчета угла поворота исследовательской детали 13 и ручка 14.

Детальнее конструкция система поворота показана на рис. 2.9. С целью сокращения времени на стабилизацию температуры поверхности исследовательская деталь 6 - полый конструкции. Для уменьшения нагрева фторопластового изолятора 11, стержень поводка 10 вмонтирован в керамическую трубку 15, что исключает его из активной площади разряда. Вакуумный герметичный узел состоит из патрубка 16, приваренного ко дну камеры, и рукава из вакуумной резины 17, который с помощью зажимов плотно облегает патрубок и шток. Благодаря упругости резины имеется возможность в определенных границах поворачивать исследовательскую деталь вокруг вертикальной оси.

Процедура экспериментов проходила в следующем порядке. С помощью разряда деталь разогревалась до определенной температуры и выдерживалась, пока температура не станет

неизменной на протяжении 10...15 минут. Деталь поворачивалась на определенный угол отсчета  $\alpha$ , фиксировались значение температуры в этой точке поверхности, деталь снова возвращалась в начальное положение и выдерживалась до состояния неменяющейся температуры. Рабочими газовыми средами были смеси: основная N68Ar22H10 (азот 68% за объемом, аргон – 22%, водород – 10%), дополнительная – Ar90H10. Исследовательские детали имели диаметры 100 и 45 мм, дистанции между деталями и между деталями и анодом устанавливались одинаковыми и изменялись от 5 до 70 мм. Рабочее давление в разрядной камере составляло 0,5; 1 и 2 тора, а номинальная температура неэкранированной дополнительным анодом точки изменялась последовательно 420, 460, 500, 540 и 580°C. Питание разряда осуществлялось от источника постоянного тока с LC- фильтром. Контрольными точками для фиксации температуры выбраны: T1 – соответствует неэкранированной точке поверхности, угол поворота  $\alpha$  - 0 градусов; T2 – точка максимально приближенная к контрдетали, углы поворота - 90 и 270 градусов, T3 - точка, максимально приближенная к дополнительному аноду, угол поворота - 180 градусов. Кроме того, фиксировалась точка Tм

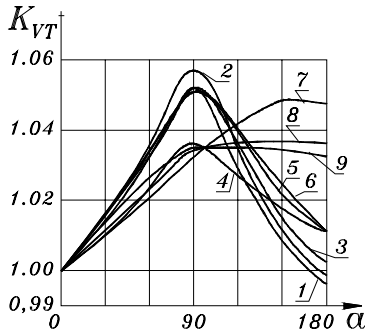


Рис. 2.10. Распределение температуры при расстоянии 5 мм

- 1 – t100d05p05t420, 2 – t100d05p05t500,
- 3 – t100d05p05t580, 4 – t100d05p10t420,
- 5 – t100d05p10t500, 6 – t100d05p10t580,
- 7 – t100d05p20t420, 8 – t100d05p20t500,
- 9 – t100d05p20t580

максимальной температуры на поверхности (в тех случаях, если она не совпадала с одной из прежде перечисленных).

Тепловой баланс детали формируется двумя компонентами: разрядной, когда поверхность нагревается в результате ее бомбардировки потоками ионов и быстрых нейтральных частиц, сформированных в ОКП; терморрадиационной, когда поверхность одной детали нагревается за счет

терморрадиационного излучения соседней. Логично прогнозировать, что повышение доли разрядной компоненты должно приводить к увеличению температуры в точке T3 или возле нее, а также к росту

мощности разряда. Дальнейший качественный

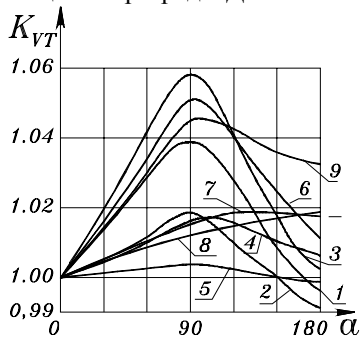


Рис. 2.11. Распределение температуры при расстоянии 10 мм

1 – t100d10p05t420, 2 – t100d10p05t500,  
3 – t100d10p05t580, 4 – t100d10p10t420,  
5 – t100d10p10t500, 6 – t100d10p10t580,  
7 – t100d10p20t420, 8 – t100d10p20t500,  
9 – t100d10p20t580

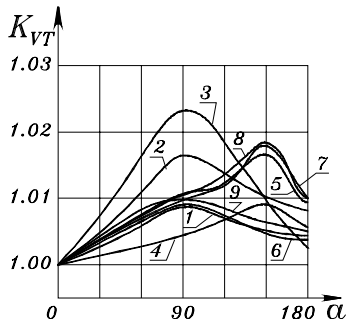


Рис. 2.12. Распределение температуры при расстоянии 50 мм

1 – t100d50p05t420, 2 – t100d50p05t500,  
3 – t100d50p05t580, 4 – t100d50p10t420,  
5 – t100d50p10t500, 6 – t100d50p10t580,  
7 – t100d50p20t420, 8 – t100d50p20t500,  
9 – t100d50p20t580

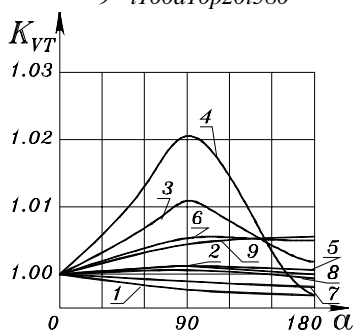


Рис. 2.13. Распределение температуры при расстоянии 70 мм

1 – t100d70p05t420, 2 – t100d70p05t500,  
3 – t100d70p05t580, 4 – t100d70p10t420,  
5 – t100d70p10t500, 6 – t100d70p10t580,  
7 – t100d70p20t420, 8 – t100d70p20t500,  
9 – t100d70p20t580

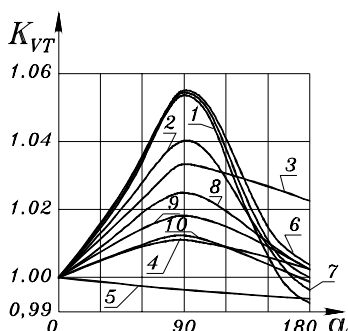


Рис. 2.14. Влияние расстояния на распределение температуры при давлении p=0,5 тора

1 – t100d05p05t420, 2 – t100d10p05t420, 3 – t100d25p05t420, 4 – t100d50p05t420, 5 – t100d50p05t420, 6 – t100d05p05t580, 7 – t100d10p05t580, 8 – t100d25p05t580, 9 – t100d50p05t580, 10 – t100d70p05t580

анализ распределения температуры на поверхности детали базируется на приведенных рисунках, причем обозначение главных характеристик конкретного эксперимента составляется по примеру: t100d05p10t420 – температура (в дальнейшем применяются буквы для обозначения мощности, расстояния) детали диаметром 100 мм, расстояние до контрдетали и дополнительного анода – 5 мм,

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
 давление 1 тор, номинальная температура неэкранированной точки - 420°С. По оси ординат отложены значения коэффициента неравномерности температуры  $K_{VT}$  как отношения температуры соответствующей точки поверхности к температуре поверхности в точке П1 (угол поворота  $\alpha=0$  градусов).

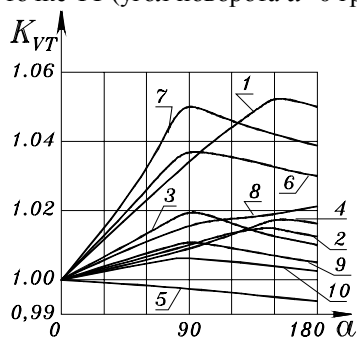


Рис. 2.15. Влияние расстояния на распределение температуры при давлении  $p=2$  тора

1 – t100d05p20t420, 2 – t100d10p20t420, 3 – t100d25p20t420, 4 – t100d50p20t420, 5 – t100d50p20t420, 6 – t100d05p20t580, 7 – t100d10p20t580, 8 – t100d25p20t580, 9 – t100d50p20t580, 10 – t100d70p20t580

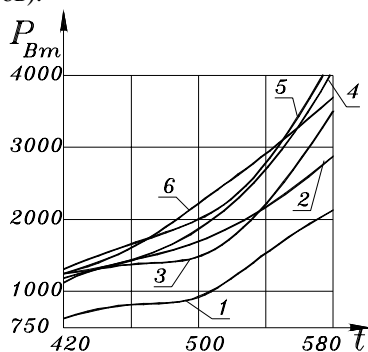


Рис. 2.16. Мощность разряда в зависимости от температуры (деталь d100)

1 – P100d05p05, 2 – P100d05p20, 3 – P100d25p05, 4 – P100d25p20, 5 – P100d70p05, 6 – P100d70p20

На рис. 2.10-2.15 наблюдаются следующие тенденции. Прежде всего, с уменьшением расстояния между деталями возрастает коэффициент неравномерности температуры  $K_{VT}$ , максимальное значение которого может достигать величины 1,06, что для номинальных температур 420...580°С соответствует абсолютной величине разности температур 25...35°С.

Эффективность процессов модификации в значительной мере обеспечивается выбором температуры, причём важно использовать ее энергетически наиболее возможные значения, но при этом избежать перехода за температурную границу предыдущих химико-термических операций (например, не допустить отпуска закаленных деталей). Кроме того, следует заметить, что полученные величины коэффициента неравномерности температуры относятся к термостационарным условиям эксперимента, когда температура фиксировалась после достаточно продолжительной выдержки. Проведенными дополнительно исследованиями при замерах температуры в процессе выхода на режим (температурное поле в нестационарных условиях) фиксировались в начальных фазах (температура 420°С) абсолютные значения разности температур до

40°C, хотя с ростом температуры эта разница уменьшалась к величинам, характерным для термостабильного режима. Отсюда вытекает вывод, что для низкотемпературных режимов модификации следует использовать минимальную скорость нагревания, поскольку в этих условиях существует реальная угроза отпуска. В целом, исходя только из влияния расстояния на коэффициент неравномерности температуры, можно рекомендовать для деталей с характерным размером 100 мм минимальное расстояние между деталями порядка 50 мм, тогда значение  $K_{VT}$  не превышает 1,02 (абсолютные значения разности температур 10...12°C). Следующая тенденция заключается в том, что с повышением давления в разрядной камере относительная доля терморadiационной компоненты снижается, поскольку улучшаются условия для ионизации газовой среды. Поэтому при давлении 2 тора в сравнении с давлением 0,5 тора (рис. 2.14, 2.15) значительно чаще точка максимальной температуры переходит у положение Т3 (напротив дополнительного анода), или между точками Т3 и Т2 (комбинированное влияние терморadiационной и разрядной компонент, причем роль последней возрастает). В общем случае коэффициент неравномерности температуры, если абстрагироваться от влияния расстояния между деталями или между деталями и дополнительным анодом, является функцией от давления и температуры, поскольку оба этих фактора влияют на соотношение терморadiационной и разрядной компонент.

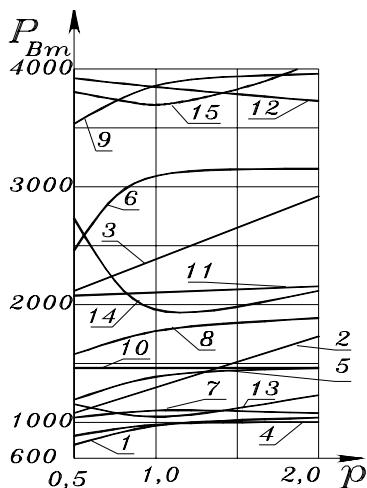


Рис. 2.17. Зависимость мощности от давления (деталь d100):

- 1 - P100d05t420, 2 - P100d05t500, 3 - P100d05t580, 4 - P100d10t420, 5 - P100d10t500, 6 - P100d10t580, 7 - P100d25t420, 8 - P100d25t500, 9 - P100d25t580, 10 - P100d50t420, 11 - P100d50t500, 12 - P100d50t580, 13 - P100d70t420, 14 - P100d70t500, 15 - P100d70t580

Тем не менее, несмотря на сложный характер взаимодействия температуры и давления, установлено, что в большинстве случаев

И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде  
 давление порядка 1 тор и температура около 500°С соответствуют

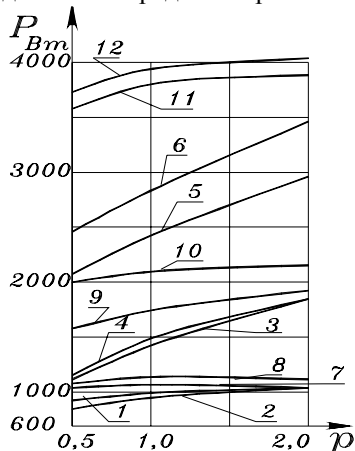


Рис. 2.18. Сопоставление с аргоновыми средами: смеси - N68Ar22H10 1-d05t420, 3 - d05t500, 5-d05t580, 7 - d25t420, 9 - d25t500, 11 - d25t580; Ar90H10 2 - d05t420, 4-d05t500, 6-d05t580, 8-d25t420, 10-d25t500, 12-d25t580

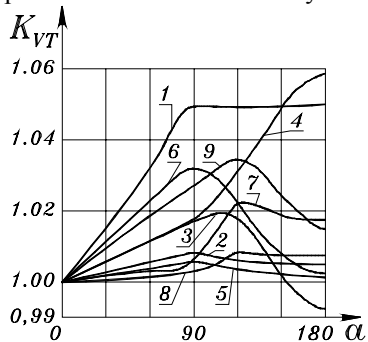


Рис. 2.19. Распределение температуры для детали диаметром 45 мм (расстояние 5 мм)

1 - t45d05p05t420, 2 - t45d05p05t500, 3 - t45d05p05t580, 4 - t45d05p10t420, 5 - t45d05p10t500, 6 - t45d05p10t580, 7 - t45d05p20t420, 8 - t45d05p20t500, 9 - t45d05p20t580

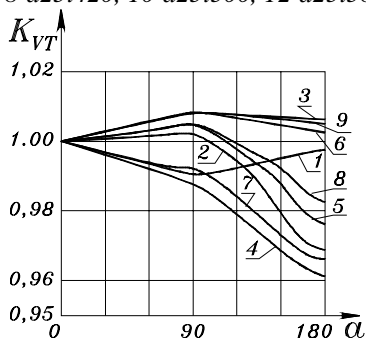


Рис. 2.20. Распределение температуры для детали диаметром 45 мм (расстояние 25 мм)

1 - t45d25p05t420, 2 - t45d25p05t500, 3 - t45d25p05t580, 4 - t45d25p10t420, 5 - t45d25p10t500, 6 - t45d25p10t580, 7 - t45d25p20t420, 8 - t45d25p20t500, 9 - t45d25p20t580

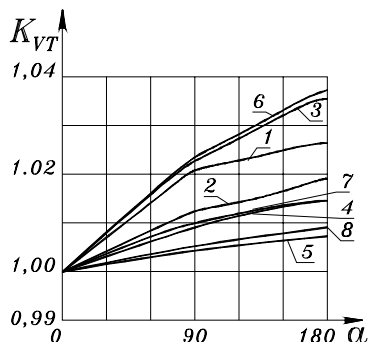


Рис. 2.21. Распределение температуры для детали диаметром 45 мм (расстояние 70 мм)

1 - t45d70p05t420, 2 - t45d70p05t500, 3 - t45d70p10t420, 4 - t45d70p10t500, 5 - t45d70p10t580, 6 - t45d70p20t420, 7 - t45d70p20t500, 8 - t45d70p20t580

точкам минимальных значений коэффициента неравномерности или

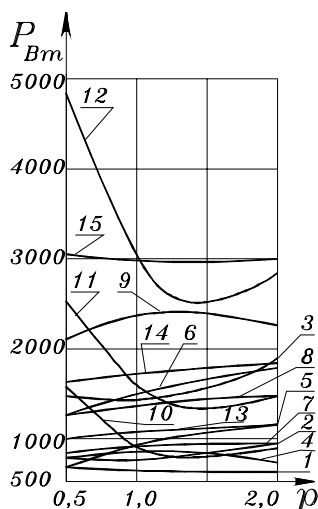


близко к ним, т.е. именно при этих параметрах создаются условия для оптимального соотношения терморadiационной и разрядной компонент.

Возможно причина этого заключается в том, что при температуре порядка  $500^{\circ}\text{C}$  в некоторой мере возрастает интенсивность ионизационных процессов в связи с ростом термоэлектронной эмиссии, в тот же время существенными еще остаются терморadiационные явления. Рис. 2.16 демонстрирует изменение мощности в зависимости от номинальной температуры и расстояния между деталями, из которого видно, что до температуры примерно  $500^{\circ}\text{C}$  мощность разряда растет незначительно, затем рост более интенсивный. Подтверждается та тенденция, что с увеличением давления возрастает роль разрядной компоненты, а это приводит к необходимости в большей мощности разряда. Особенно это заметно при малых расстояниях, когда для повышения весоности разрядной компоненты нужно существенно повысить мощность, и, наоборот, при большом расстоянии, когда практически отсутствует терморadiационный контакт деталей, давление в меньшей мере влияет на изменение мощности, в некоторых случаях наблюдается даже ее снижение или наличие минимума. В этом смысле следует отметить, что принятая модель эксперимента, когда термостабильность является следствием компромисса терморadiационной и разрядной компонент, не может в полной мере использоваться для исследования влияния давления на мощность разряда. Поэтому для большинства режимов при изменении давления мощность очень мало изменялась (возрастала одна компонента, но и одновременно пропорционально уменьшалась другая), и в случае, когда расстояние значительное, т.е. превалирует разрядная компонента для всех температур, особенно -  $500^{\circ}\text{C}$  - отслеживается минимум при давлении порядка 1 тор (рис. 2.17).

Тезис о соотношении терморadiационной и разрядной компонент в зависимости от условий эксперимента подтверждают опыты в газовых средах с преобладающим содержимым аргона ( $\text{Ar}90\text{N}10$ ). Из рис. 2.18 видно, что при малых расстояниях и температурах, т.е. когда разрядная компонента не играет существенной роли, разности в мощности разряда практически нет (при расстоянии 5 мм такое соотношение наблюдается до температуры  $500^{\circ}\text{C}$  включительно). Тем не менее, с увеличением расстояния температура поверхности все в большей мере формируется за счет разрядной компоненты, мощность разряда заметно отличается, причем она больше для аргоновой среды, учитывая большую ионизационную способность аргона (рост тока) и массу ионов сравнительно с азотом, который доминировал в

Характер распределения температуры на поверхности детали диаметром 45 мм показан на рис. 2.19-2.21. Уменьшение характерного размера детали еще четче подчеркивает общие положения влияния расстояния между деталями на характер распределения температурного поля по поверхности детали: уже при значительно меньшем, чем для предыдущей детали, расстоянии (25 мм вместо 50 мм) характер распределения температуры изменяется, в точке Т2 коэффициент неравномерности распределения температуры резко снижается, температура точки Т3 – минимальная или равная точке Т1 (подобное для детали диаметром 100 мм наблюдалось только при расстоянии 70 мм). При расстоянии 70 мм для всех условий разряда точка максимальной температуры смещается в положение Т3, т.е. главной однозначно становится разрядная компонента.



*Рис. 2.22. Зависимость мощности разряда от давления (деталь d45):*

- 1 – P45d05t420, 2 – P45d05t500, 3 – P45d05t580, 4 – P45d10t420, 5 – P45d10t500, 6 – P45d10t580, 7 – P45d25t420, 8 – P45d25t500, 9 – P45d25t580, 10 – P45d50t420, 11 – P45d50t500, 12 – P45d50t580, 13 – P45d70t420, 14 – P45d70t500, 15 – P45d70t580

Интересная тенденция наблюдается относительно мощности разряда (рис. 2.22). Если для детали диаметром 100 мм конструктивной схемой опыта (в основном ограничение перемещения зависит от диаметра камеры) не предусматривалась возможность установления расстояния, равного характерному размеру, поэтому только при расстоянии 70 мм наблюдался резко экстремальный характер изменения мощности в зависимости от давления (рис. 2.17), то подобное явление для детали диаметром 45 мм наиболее четко отслеживается при расстоянии 50 мм (расстояние приблизительно соответствует характерному размеру детали), а затем при увеличении расстояния мощность разряда при изменении давления снова меняется незначительно. Это дает повод

утверждать, что расстояние порядка характерного размера приемлемо только при давлениях 1...1,5 тора, который сужает рамки

возможных технологических параметров обработки. При другом давлении в разрядной камере, особенно при малом, мощность неоправданно резко возрастает.

Таким образом, распределение температуры поверхности деталей, которые проходят вакуумно-диффузионную газоразрядную модификацию, зависит от температуры процесса, давления в камере, расстояния между деталями или между деталями и анодом, состава газовой среды и соотношения расстояния и размеров самого объекта модификации (характерный размер, в качестве которого можно принимать меньший из габаритных размеров проекции детали на плоскость, перпендикулярную оси между центрами деталей или между центром детали и анодом). Коэффициент неравномерности температуры, как отношение максимальной к минимальной в условиях стационарного режима достигает значений 1,06, а абсолютная разность температур в условиях нестационарного режима может достигать 40°C (без учета возможного перегрева локальных исключений поверхности). В качестве ориентировочного расстояния между деталями можно рекомендовать величину, равную половине от характерного размера детали. Расстояние же порядка характерного размера наиболее нецелесообразно в связи с возможным резким повышением мощности разряда, особенно в фазе выхода на температурный режим.

Приведенные выше выводы можно использовать не только для проектирования процессов ВДГРТ модификации поверхности металлов в части обоснования показателей производительности оборудования, но и для оптимизации параметров режима по критерию рационального использования энергетических ресурсов.

#### ***2.4 Типовые технологические режимы безводородного азотирования в тлеющем разряде***

Нижеприведенные технологические режимы составлены на основе многолетних экспериментальных и производственных работ, выполненных на установках промышленного назначения. Главной особенностью банка данных, включенных в табл. 2.1, является метод измерения температуры деталей в процессе обработки. В практике АТР в основном применяются два метода контроля этого наиболее существенного для результатов обработки параметра: термоэлектрический и терморadiационный. Оба метода обладают как преимуществами, так и недостатками. Суть термоэлектрического метода состоит в установке на поверхности детали термопары, сигнал от которой выводится на внешние контрольные, регистрирующие или регулирующие приборы. Этот метод позволяет

сколь угодно точно контролировать локальную температуру, особенно в местах, где возможна концентрация поля и местный перегрев, что является его главным преимуществом. В принципе становится возможным отслеживать температуру в любой точке поверхности и в любой момент процесса. Однако термоэлектронный датчик должен иметь надежный контакт с поверхностью ибо любой зазор самым существенным образом скажется на достоверности получаемых данных. В то же время термопара должна быть изолирована от детали, на которую подается значительный отрицательный потенциал, особенно в начальной фазе катодной очистки. Все попытки создать электрическую развязку между термопарой, устанавливаемой без изолятора на поверхности и системой управления на которую собственно и выводится сигнал от термопары, надежных и безопасных результатов не дали. Поэтому при применении термопар нередко возникает ситуация, когда после фазы очистки начинается выход на требуемый температурный режим, и только тогда обнаруживается, что контроля температуры нет или показания явно неправдоподобны. Не исключена ситуация, когда заряд на поверхности начинает пробивать термопару, тогда продолжение процесса невозможно и небезопасно. Для исправления недостатка необходимо выключить камеру, сделать многочасовую выдержку для остывания деталей (во избежание нежелательных деформаций детали при резком охлаждении, отпуска и появления цветов побежалости), разгерметизировать ее и только тогда приступить к ремонту.

Всех перечисленных недостатков лишен терморadiационный метод, использующий пирометр терморadiационного излучения. Однако температура в этом случае является следствием усреднения, в том числе и за счет излучений свечения в ОКП. Надежные и сопоставимые данные в случае применения терморadiационного метода можно получить, если предварительно измерительную систему тарировать на конкретной установке по специальной методике, предусматривающей применение специального приспособления с подогревом от ТЕНа. Это приспособление устанавливается в камеру, показания излучения с поверхности вносятся в тарировочную таблицу, индивидуальную для каждой установки, ибо в этом случае учитываются даже потери светового потока в иллюминаторах, за чистотой которых нужно следить.

Примеры некоторых изделий – объектов БАТР показаны на рис. 2.23-2.30.



Рис. 2.23. Литейная форма



Рис. 2.24. Режущий инструмент



Рис. 2.25 Гильза экструдера



Рис. 2.26 Кольцо



*Рис. 2.27. Пуансон*



*Рис. 2.28. Валок*



*Рис. 2.29. Диск*



*Рис. 2.30. Процесс БАТР*

Таблица 2.1

## База данных типовых технологических режимов

№	Марка	Исходное состояние				Технологические параметры режима			
		ХТО	T <sub>нагрева</sub> , °C	T <sub>отпуска</sub> , °C	HV <sub>0,1</sub>	T, °C	p, тор	Газ, % (N <sub>2</sub> +Ar)	HV <sub>0,1</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Сталь 3	Нормал.	-	-	131	580	1,8	75 + 25	635 - 691
2	Сталь 8 кп	Нормал.	-	-	131	560	0,5	25 + 75	394 - 400
3	Сталь 10 кп	Нормал.	-	-	131	580	0,5	25 + 75	400 - 442
4	Сталь 20	Нормал.	-	-	131	540	0,6	75 + 25	635 - 716
		Зак.+Отп.	800 - 820	180 - 200	143 - 170				
					200 - 250	560			500 - 821
5	Сталь 35	Отжиг	820 - 840	-	207	580	2,0	75 + 25	537 - 667
		Нормал.	850 - 900	-	217				
		Улучш.	850 - 890	600 - 620	285 - 390				
6	Сталь 45	Отжиг	820 - 840	-	229	540/	2,0	75 + 25	600 - 700
		Нормал.	840 - 870	-	229	580			
		Улучш.	800 - 830	400	260 - 342	560	2,0	75 + 25	774 - 1036
				500	227 - 255				540
				600	191 - 209	560			774 - 1036

Таблица 2. Технологические особенности процесса

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7	ОЗХ17Н8Г5М ФАБ	-	-	-	373	570	0,6	75 + 25	1140
8	О8Х18Н10Т	Зак.+Отп.	1050 - 1100	700	268 - 273	580	0,8	75 + 25	504 - 836
9	10Х11Н23ТЗМ	Зак.+Отп.	1170 - 1200	750	363 - 420	620	0,6	75 + 25	909 - 989
10	12ХН3А	Отжиг	870 - 900	-	217	570	1,8	75 + 25	909 - 946
		Зак.+Отп.	860	180	460 - 474	540	0,5	25 + 75	909 - 946
				200	400				
				300	380				
				400	375				
		500	280	570	1,8	75 + 25	909 - 946		
Цемент. 900 - 920	810	200	694 - 804	540	0,5	25 + 75	946 - 1036		
11	12Х8Н10Т	Зак.+Отп.	1050 - 1100	750	335 - 423	580	0,5/1, 8	75 + 25	836 - 1036
12	12Х18Н9Т	Зак.+Отп.	1050 - 1100	700	363 - 429	600	0,6/1, 8	75 + 25	946 - 989
13	12Х18Н10Т	Зак.+Отп.	1050 - 1100	700	363 - 429	580	0,6/1, 8	75 + 25	836 - 946
14	12Х21Н5Т	Зак.+Отп.	950 - 1050	750	335 - 423	580	0,6/1, 8	75 + 25	946 - 989
15	14Х17Н2	Зак.+Отп.	975 - 1040	680 - 700	450	560	1,2	75 + 25	1000



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	18ХНМ	Зак.+Отп.	830 - 850	180 - 200	537 - 600	510	0,6	75 + 25	774 - 804
17	18ХГСА	Отжиг	-	-	207	570	0,8	75 + 25	989 - 1197
		Зак.+Отп.	850 - 870	500 - 650	350 - 400				
18	18ХГТ	Отжиг	860 - 900	-	217	580	0,6/1, 8	75 + 25	716 - 836
		Нормал.	940 - 970	-	255				
		Зак.+Отп.	830 - 850	180 - 200	350 - 400	570	0,6/1, 8		774 - 909
		Цемент. 950 - 970	810	180 - 200	694 - 804				
19	20Х	Отжиг	860 - 870	-	179	570	0,6	75 + 25	690 - 716
		Нормал.	870 - 900	-	270				
		Зак.+Отп.	860 - 880	480 - 540	250				
		Цемент. 900 - 920	810	170 - 190	300				
20	20ХГН2МБФ				353	560	0,5	75 + 25	667 - 716
21	20Х2Н4А	Зак.+Отп.	820	500	260 - 290	490	0,6	75 + 25	900 - 930
22	20Х13	Зак.+Отп.	1000 - 1050	660	380 - 440				
				200 - 300	534 - 551	490	0,5	75 + 25	740 - 1200
23	25Х5М				716 - 804	540	0,6	75 + 25	909 - 946
24	26ГСМ				320 - 340	560	0,8	75 + 25	730 - 740

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25	3ХВ8Ф	Отжиг	860 - 880	-	207 - 255	580	0,5	75+25	909 - 1036
		Зак.+Отп.	1130 - 1160	600 - 630	474 - 550				1197 - 1140
				630 - 660	435 - 474				1036 - 1140
				660 - 680	390 - 435				1036 - 1086
				750 - 780	269				909 - 1036
26	30ХГС	Отжиг	840 - 860	-	229	560	0,8	75 + 25	667 - 716
		Нормал.	-	500 - 600	228 - 293				
		Зак.+Отп.	850 - 880	200 - 600	240 - 280				
27	30ХМЮА	Зак.+Отп.	930 - 940	600 - 650	398 - 450	580	1,8	75 + 25	836 - 909
28	3Х2В8Ф	Отжиг	860 - 880	-	208 - 255	560/ 580	0,5/0, 6	75 + 25	1100 - 1175
		Зак.+Отп.	1130 - 1160	600 - 630	480 - 551				
				630 - 660	435 - 502				
				660 - 680	385 - 460				
		1070 - 1100	580 - 600	480 - 551					
			600 - 620	435 - 502					
			620 - 640	390 - 460					
750 - 780	270								
29	30Х2НВА				370 - 440	535	0,8	75 + 25	790 - 1050
30	30Х3МФСА	Зак.+Отп.	850 - 870	580 - 600	353 - 400	570	2,0	75 + 25	873 - 900
31	35ХГА	Зак.+Отп.	880 - 900	200 - 300	537	490	1,8	75 + 25	744 - 804

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
32	35ХГСА	Зак.+Отп.	880 - 890	200	550 - 670	480	1,5	75 + 25	872 - 1111
33	38ХС	Зак.+Отп.	900	600	295 - 340	560	0,8	75 + 25	670 - 730
34	38ХМЮА	Отжиг	930 - 940	-	229 - 320	580	1,8	75 + 25	804 - 1200
		Зак.+Отп.	930 - 940	640	240 - 280		1,5/1,8		1036 - 1460
				330		1,5	800 - 1200		
				370 - 510	560	1,8	1100 - 1150		
35	38Х2МЮА	Отжиг	930 - 940	-	229 - 320	580	1,8	75 + 25	946 - 1086
		Зак.+Отп.	930 - 940	640	240 - 280				1036 - 1197
				500	560	1,5	1200		
36	40Х	Отжиг	825 - 845	-	217	560/	1,2	75 + 25	716 - 909
		Нормал.	-	680 - 700	229 - 252	580			909 - 1086
		Зак.+Отп.	830 - 860	200	640	560	1,8		
				300	550				
				400	440				
				500	325	560/	1,2 - 1,8	75 + 25	536 - 1000
600	264	540/	1,2 - 1,5	850 - 1200					
37	40ХЛ	Зак +Отп.	850 - 860	600 - 650	196 - 229	560	0,6	75 + 25	716 - 836

Глава 2. Технологические особенности процесса

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
38	40XH	Отжиг	820 - 850	-	229	570	1,8	75 + 25	909 - 946
		Нормал.	-	600 - 650	196 - 241				
		Зак.+Отп.	820 - 840	500 - 600	217 - 255				
39	40X2H2MA	Зак.+Отп.	870	600	300 - 330	560	1,8	75 + 25	700 - 770
40	4X4BMФC	Отжиг	860 - 890	-	197 - 229				
		Зак.+Отп.	1050 - 1070	520 - 540	606 - 649	550	0,5	25 + 75	850 - 1000
				540 - 580	587 - 606	580			909 - 946
				580 - 620	502 - 587				804 - 909
				620 - 670	390 - 502				
750 - 780	269								
41	4X5BФC	Зак.+Отп.			380 - 788	460	0,6	25 + 75	1296 - 1521
					676	580	0,6	75 + 25	1231 - 1296
					788				
42	4X5B2ФC	Отжиг	850 - 860	-	197 - 228	570	0,6	75 + 25	
		Зак.+Отп.	1030 - 1050	540 - 560	587 - 625	580			1006
				560 - 580	502 - 587				
				580 - 600	435 - 502	570			946 - 1197
				600 - 620	390 - 460				
750 - 780	270								

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
43	4X5MФ	Отжиг			333	580	0,6	62 + 38	1197
		Зак.+Отп.			572 - 772	560		75 + 25	1036 - 1259
44	4X5MФС	Отжиг	830 - 850	-	207 - 255	580	0,5	25 + 75	537 - 614
		Зак.+Отп.	1000 - 1020	500 - 520	667 - 716	550	0,5	75 + 25	1259
				570/ 580		0,6	909 - 1140		
				520 - 550	587 - 649	550	0,5/0, 6	25 + 75	909 - 989
				550 - 570	502 - 587	580			909 - 1100
				730 - 760	269	580			537 - 614
45	40X9C2	Отжиг.	850 - 870	-	229 - 255	580	0,6	75 + 25	774 - 800
		Зак.+Отп.	1050 - 1100	200 - 600	353 - 458				
46	40X10C2M	Зак.+Отп.	1050 - 1150	200 - 300	353 - 458	580	0,6	75 + 25	830 - 1086
				700 - 750	229 - 255				
47	40X13	Зак.+Отп.	1050 - 1100	200 - 300	534 - 606	490	0,6	75 + 25	1197 - 1259
						520			1300
				400 - 500	465	520			1230
				500 - 600	350	520			974
				600 - 650	311 - 331	490			1197 - 1259

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
48	45X	Отжиг	815 - 830	-	229	580	1,8	75 + 25	716 - 900
		Нормал.	-	540 - 560	239 - 272				
		Зак.+Отп.	820 - 840	500 - 650	230 - 350				
49	5XHM	Отжиг	760 - 790	-	197 - 241	570	0,6	25 + 75	774 - 804
		Зак.+Отп.	830 - 860	380 - 420	502 - 587				
				420 - 500	435 - 502				
				500 - 550	390 - 435				
				550 - 650	286 - 390				
650 - 690	241								
50	5X3B3MФC	Отжиг	890 - 860	-	197 - 229	580	0,5	25 + 75	1200 - 1250
		Зак.+Отп.	1120 - 1140	540 - 560	606 - 649				
				600 - 620	502 - 587				
				620 - 650	435 - 502				
				650 - 680	390 - 460				
750 - 780	269								
51	55CM5-ВДП				836 - 900	560	2,0	80 + 20	1140 - 1197
52	55X20Г9АНЧ				394	500	0,6	75 + 25	800 - 989
53	60C2	Отжиг	850	-	269 - 302	580	0,8	75 + 25	614 - 691
		Зак.+Отп.	850 - 870	430 - 460	477 - 388	520	0,8		909 - 946

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
54	65Г	Нормал.	-	-	241 - 285	580	0,6	25 + 75	520 - 614
		Зак.+Отп.	830 - 850	480	420 - 475				
55	У7А	Отжиг	730 - 750	-	187	560	0,6	25 + 75	555 - 716
		Зак.+Отп.	800 - 820	150 - 220	649 - 804	500			774 - 1036
56	У8, У8А	Отжиг	730 - 750	-	187	560	0,6	25 + 75	573 - 744
		Зак.+Отп.	780 - 800		300	480		75 + 25	530 - 700
					150 - 220	649 - 804	500	0,6	25 + 75
57	8Х4В9Ф2				333	540	0,5	75 + 25	716 - 774
58	9ХС	Отжиг	790 - 810	-	241	560	1,2	75 + 25	716 - 774
		Зак.+Отп.	840 - 860	160 - 180	694 - 840	540	0,6		1086 - 1140
59	9ХФ	Отжиг	760 - 790	-	255	580	0,5	75 + 25	909 - 946
		Зак.+Отп.	850 - 880	200 - 250	694 - 804	560	1,2		946 - 989
60	У10, У10А	Отжиг	-	-	187	560	0,6	25 + 75	719 - 774
		Зак.+Отп.	760 - 780	150 - 220	649 - 804	500			890 - 1036
61	ХВГ	Отжиг	780 - 800	-	255				
		Зак.+Отп.	830 - 850	150 - 300	694 - 804	550	0,6	75 + 25	946 - 1140
62	ШХ15	Нормал.	880 - 890	-	270 - 300	570	0,6	75 + 25	537 - 804
		Зак.+Отп.	825 - 850		330		1,5		750
				150 - 250	684 - 867		540		0,6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
63	Х6ВФ	Отжиг	830 - 850	-	241				
		Зак.+Отп.	980 - 1000	150 - 170	820 - 867	540	0,6	75 + 25	1650 - 1750
280 - 300	649 - 694			1380 - 1400					
64	Х12М	Отжиг	850 - 870	-	255				
		Зак.+Отп.	1000 - 1030	190 - 210	774 - 840	580	0,8	75 + 25	1197 - 1259
320 - 350	649 - 694			730 - 1140					
65	Х12Ф1	Отжиг	850 - 870	-	255				
		Зак.+Отп.	1000 - 1050	180 - 200	774 - 840	580	0,8	75 + 25	1140 - 1197
400 - 420	649 - 694			1036 - 1140					
66	110Х18М	Отжиг		-	229 - 260	540	0,5/1, 8	75 + 25	836 - 909
		Зак.+Отп.		150 - 160	791 - 804				
				400 - 420	649 - 694				
Нормал.	920 - 950	-	270 - 300	580	0,8	989 - 1086			
67	Р6М5	Отжиг	840 - 880	-	255	490	1,8	75 + 25	667 - 774
		Зак.+Отп.	1200 - 1230	540 - 560	820 - 900		0,8		1060 - 1200
					867 - 940	490	1,8		1086 - 1140
					950	490	0,8		1040
68	Р6АМ5	Зак.+Отп.	1200 - 1230	540 - 560	774 - 900	500	0,8	75 + 25	989 - 1140
69	Р9К5	Зак.+Отп.	1210 - 1240	560 - 580	867 - 940	520	1,8	75 + 25	1140 - 1200



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
70	P18	Зак.+Отп.	1270 - 1290	560 - 570	803 - 940	500	0,8	75 + 25	1086 - 1140
71	BK6				1600 - 1700	600	0,6	75 + 25	1800 - 1900
72	BK8				1500 - 1600	600	0,6	75 + 25	1800 - 2000
73	BK15				1200 - 1326	600	0,6	75 + 25	1600 - 1870
74	T5K10				1200 - 1500	600	0,6	75 + 25	1600 - 1800
75	T15K6				1400 - 1500	600	0,6	75 + 25	1800 - 1900
76	АЛ25				103	200	0,02	75 + 25	328 - 333
77	Титан				416 - 455	1000	2,4	15 + 85	836 - 1140
78	Металлокерамика				1140 - 1197	600	0,6	75 + 25	1300 - 1400
79	СЧ20 СЧ24	Отжиг	-	-	163 - 229	580	1,2	75 + 25	804 - 909
		Зак.+Отп.	850 - 930	500	308	580	1,2		804 - 909
				550	291				
				600	250				
				630	245				
80	СЧ50	Отжиг	850 - 930	-	229 - 289	580	1,2	75 + 25	909 - 1036
		Зак. ТВЧ	840 - 950	-	500 - 600				989 - 1140
81	ВЧ50	Отжиг	-	-	180 - 260	580	1,2	75 + 25	909 - 1036
		Нормал.	900 - 950	550 - 600	214 - 289				1036 - 1197
		Зак. ТВЧ	950 - 1100	-	500 - 650				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
82	ЦМ-6				294	1000	2,0	75 + 25	1100 - 1200
83	ЦМ-10				281	900	2,0	75 + 25	1100 - 1200

Примечания к табл. 2.1

1. Температуры режима измерялись терморadiационным методом.
2. Состав газа дан в процентах в последовательности азот, аргон.
3. Поверхностная микротвердость измерялась в единицах шкалы Виккерса при нагрузке 100 грамм.
4. Для удобства пользования таблица отсортирована по содержанию углерода в сталях.
5. Данные в колонках 4 и 5 – справочные.

Несмотря на то, что все параметры технологического режима взаимосвязаны, существует определенная система приоритетов при их назначении. Первичным является выбор температуры процесса, поскольку от нее зависит не только сам ход преобразований в поверхностном слое, но возможные негативные последствия, связанные с перегревом детали в целом или локально. В этом случае реален отпуск металла, в результате чего поверхностная микротвердость, равно как и твердость основы, могут быть даже меньшими, чем до модификации. В зависимости от точности и надежности системы контроля и управления температурой ее в первом приближении следует выбирать такой, чтобы гарантировано не превысить температуру отпуска. Состав газовой среды и давление выбираются в зависимости от марки материала по табл. 2.1. Далее сообразно массе садки выбираются электрические параметры разряда – напряжение и сила тока, исходя из двух условий: существование устойчивого аномального тлеющего разряда, включая его зажигание (см. главу 1), и поддержку необходимого температурного режима, в том числе – и в фазе выхода на рабочий температурный режим.

### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Лахтин Ю. М. Диффузионные основы процесса азотирования. – Металловедение и термическая обработка металлов,- 1995, №7, с. 14-17.
2. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Азотирование стали. М., Машиностроение, 1976, 256 с.
3. Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка сплавов в активизированных газовых средах. Вестник машиностроения, 1986, №9. С. 49-53.
4. Арзамасов Б. Н., Братухин А. Г., Елисеев Ю. С., Панайоти Т. А. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: Из-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 1999. 400 с.
5. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Шпис Г.-Й., Бемер З. Теория и технология азотирования. М.: Металлургия. 1991. 320 с.
6. Kolbel J. Die Nitridschichtbildung bei der Glimmnitrierung, Forsch. Ber. d. Land. NRW Nr 1555, (1965)
7. Keller K. Schichtaufbau glimmitrierten Eisenwerkstoffe // Harterei Technische Mitteilung. 1971. Bd. 26, №2. S. 120-128.
8. Edenhofer V. Bewley T. J. Heat Treatment, 1976, Metal Soc., London, 7-13 (1978)
9. Михайлов И. А. Ионные соотношения при разрядном азотировании// МиТОМ. 1965, №10, С. 50-51.
10. Лахтин Ю. М. Физические основы процесса азотирования. М.: Машгиз, 1948. 14 с.
11. Лахтин Ю. М., М., Силина Н. В., Федчун В. А. Структура и свойства азотированных бинарных сплавов...// МиТОМ. 1977. №1. С. 2-7.
12. Лахтин Ю. М., М., Силина Н. В. Природа высокой твердости легированного феррита после азотирования// МиТОМ. 1977. №6. С. 23-31.
13. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Булгач А. А. Азотирование в машиностроении// Сб. Научных трудов МАДИ. 1986. С. 42-59.
14. Лахтин Ю. М., Булгач А. А. Теория химико-термической обработки стали. М.: Машиностроение, 1982. 53 с.
15. Прокошкин Д. А. Химические и термические методы обработки стали// Сб. трудов МИСиС. ОНТИ. 1938. С. 3-133.
16. Белоцкий А. В. Структура азотистых фаз и принципы легирования сталей для азотирования// МиТОМ. 1975. №12. С. 24-27.
17. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Булгач А. А. Расчет влияния легирующих элементов на растворимость и диффузию азота в фазах в сталях в процессе азотирования// Труды МАДИ. 1978. С. 42-59.

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*

18. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Александров В. А. Новые системы контроля процесса азотирования// МиТОМ. 1978. №4. С. 47-51.

19. Лахтин Ю. М., Крымский Ю. Н., Семенов В. А. Азотирование высокопрочного чугуна в тлеющем разряде// МиТОМ, 1964. №3. С. 37-41.

20. Арзамасов Б. Н., Михайлов И. А. Исследование некоторых процессов ионного азотирования. М.: ТОСИНТИ. 1967. №18-16-1319/113\ 12 с.

21. Каплун В. Г. Научные основы технологии упрочнения деталей машин и инструмента ионным азотированием в безводородных средах: Диссертация на соиск. уч. ст. докт. техн. наук.- 1991.- 398 с.

22. Панайоти Т. А. Азотирование высокопрочных сталей и сплавов в тлеющем разряде. М.: Машиностроение, 1989. 40 с.

23. Бабад-Захряпин А. А., Кузнецов Г. Д. Химико-термическая обработка в тлеющем разряде. М.: Атомиздат, 1975. 175 с.

24. Лахтин Ю. М., Крымский Ю. Н. Физические процессы при ионном азотировании// в кн.: Защитные покрытия на металлах. К.: Наукова думка, 1968. Вып. 2. С. 225-229.

25. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Структура и прочность азотированных сплавов. М.: Металлургия, 1982.

26. Бутенко О. И., Головчинер Я. М., Скотников С. А. Формирование диффузионного слоя при ионном азотировании// в кн.: Прогрессивные методы термической и химико-термической обработки. М.: Машиностроение. 1972. С. 122-128.

27. Бутенко О. И. Лахтин Ю. М. О механизме ускорения диффузии азота в железе при ионном насыщении// МиТОМ, 1969. №6. С. 21-24.

28. Арзамасов Б. Н., Панайоти Т. А. Роль удельной мощности разряда при ионной химико-термической обработке сплавов// МиТОМ, 2000. №.: С. 31-34.

29. Edenhofer V. Fortschritte in Prozessregelung beim Plasma nitriden// Harten-Technische Mitteilung. 1989. Bd. 44, #6. S. 339-345.

30. Keller K. Schichtaufbau glimmitrierten Eisenwerkstoffe// Harten-Technische Mitteilung. 1971. Bd. 26, #2. S. 120-128.

31. Edenhorer V. Möglichkeiten und Grenzen der Plasmaaufkohlung: Vorgetragen auf dem 45. Hartenrei-Kolloquium// Harten-Technische Mitteilung. 1990. Bd. 45, #3. S. 154-162.

32. Межанов А. Е., Кольцов В. Е. Термодинамическая модель процесса азотирования в тлеющем разряде// Методы поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента: Труды МАДИ. М., 1983. С. 53-59.

33. Bogdanov A.V., Dubrovsky G.V., Krutikov M.P. Interaction of gases with surfaces: Detailed description of elementary processes a.kinetics– Berlin etc.: Springer. – 1995. – XIV,132 с: ил. –(Lecture notes in physics.N.S.m:Monographs; N25 ан).– Германия.

34. Holemár A., Hruby V. Iontova nitridace v praxi– Praha : SNTL, 1989. – 242 с.

35. Кристя В. И.. Моделирование взаимодействия поверхности твердого тела с плазмой тлеющего разряда и разработка физических основ прогнозирования свойств холодных катодов: Автореф. дис. . д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / НИИ материалов электронной техники. – М., 1996. – 35 с.

36. Ламонов И. М. Создание научных основ и разработка комплексов электротехнического оборудования для восстановления и упрочнения деталей в энергетике методом ионно-плазменной обработки: Дис. . д-ра техн. наук: 05.09.03. – Акмола; Запорожье, 1996. – 263 с.

37. Оганян Г. В. Повышение надежности твердосплавных инструментов путем ионного азотирования и нанесения износостойкого покрытия: Дис. . канд. техн. наук: 05.03.01. – М., 1994. – 229 с.

38. Рубинштейн В. М. Упрочнение инструментальных материалов нанесением кремнийсодержащих покрытий в низкотемпературной плазме: Автореф. дис. . к. . наук: 05.16.01 / Курск. гос. техн. ун-т. – Курск, 1998. – 23 с.

39. Сенчило И. А. Теоретические и технологические основы направленного улучшения свойств поверхностных слоев изделий из инструментальных материалов посредством их ионно-вакуумной модификации: Автореф. дис. . д-ра техн. наук: 05.03.01; 05.02.08 / Санкт-Петербург. гос. техн. ун-т. – СПб., 1995. – 33 с.

## ГЛАВА 3

# ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА

### 3.1. Общие сведения об установках АТР

В зависимости от планируемой программы обработки, номенклатуры деталей установки для АТР могут быть однокамерными (рис. 3.1), многокамерными или многопозиционными. Отличие между двумя последними типами



Рис. 3.1. Однокамерная установка ИПАС-11012



Рис. 3.2.. Трехкамерная установка ИПА-3106

состоит в том, что многокамерные установки имеют общие системы создания вакуума, подготовки газовой среды, энергопитания и управления. С помощью коммутаторов камеры поочередно в меру готовности подсоединяются к названным системам общего пользования.

Целесообразность потребности в подобном оборудовании особенно очевидна в тех случаях, когда продолжительность собственно обработки мала в сравнении с длительностью всего цикла обработки, например, при упрочнении режущего инструмента. Тогда в одной камере проходит обработка, в другой остывание, в третьей – подготовка новой садки. Именно для таких целей была спроектирована и изготовлена трехкамерная установка, показанная на рис. 3.2. Многопозиционные установки имеют общий

корпус камеры, который по мере готовности отдельных постов к обработке переставляется на этот пост (позицию). Пример подобной двухпозиционной установки по материалам мирового лидера производства оборудования для азотирования и карбонитрирования в тлеющем разряде фирмы Klöckner-Ionon GmbH, ФРГ показан на рис. 3.3.



Рис. 3.3. Двухпозиционная установка фирмы Klöckner-Ionon GmbH

Структурные схемы оборудования в принципе мало отличаются друг от друга, поскольку в них обязательно входят системы для создания вакуума, энергопитания, приготовления и дозирования газовой смеси. К ним могут добавляться в случае, если это не однокамерная установка, различные устройства для коммутации. Типовая схема структуры двухкамерной установки показана на рис. 3.4.

Особенностью этой схемы является то, что она соответствует установке для БАТР (проект ПНФТЦ ХНУ). Как уже отмечалось выше безводородное азотирование выдвигает ряд дополнительных требований, связанных с необходимостью повышенной герметичности, более тщательной депассивации поверхности в процессе катодной очистки, необходимостью удаления кислорода из газовой среды (при содержании кислорода более 1% по объему процесс практически не проходит). В связи с этим разработанные установки конструкции ПНФТЦ ХНУ имеют ряд принципиальных конструктивных отличий в сравнении с отечественными и зарубежными аналогами:

- наличие системы подготовки газовой среды, позволяющей дозировать и подготавливать многокомпонентные насыщающие газовые смеси, в том числе и в ходе процесса;
- наличие замкнутой системы циркуляции рабочих газов, обеспечивающей высокую экономичность и экологическую чистоту работы установок;
- наличие контролера, обеспечивающего автоматический выход на заданный режим и поддержание его с высокой точностью и надежностью, а также гарантированную отсечку перехода тлеющего разряда в дуговой; - наличие системы подвода рабочей смеси к поверхности, обеспечивающей высокое качество азотирования за

И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде  
 счет стабильности азотного потенциала в процессе диффузионного насыщения

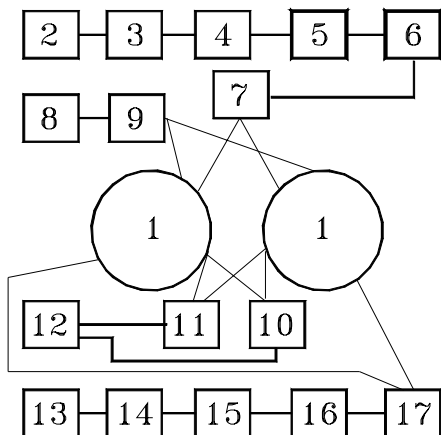


Рис. 3.4. Структурная схема двухкамерной установки для азотирования в тлеющем разряде

1-разрядные камеры, 2-газовые компоненты, 3-смеситель, 4- влагоотделитель, 5-кислородная ловушка, 6-регулятор расхода газа, 7-газовый коммутатор, 8-вакуумная система, 9-вакуумный коммутатор, 10-контроллер, 11-система блокировок, 12- система управления, 13-регулятор напряжения, 14- трансформатор, 15-выпрямитель, 16-балластный регулятор,

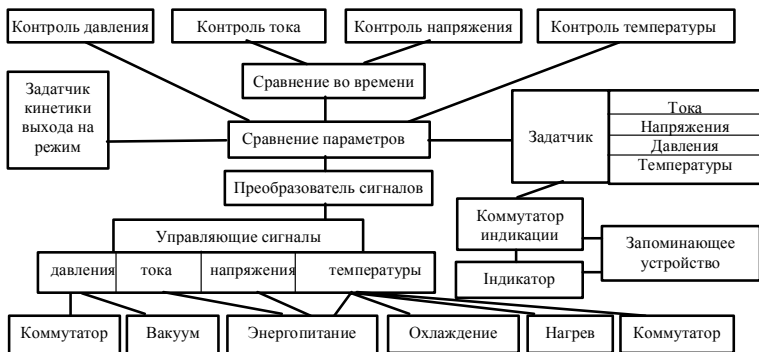


Рис. 3.5. Схема основных функций системы управления

Основу установки составляет система управления, схема функциональных связей которой показана на рис. 3.5.



Общая структура взаимосвязей систем установки для БАТР представлена на рис. 3.6.

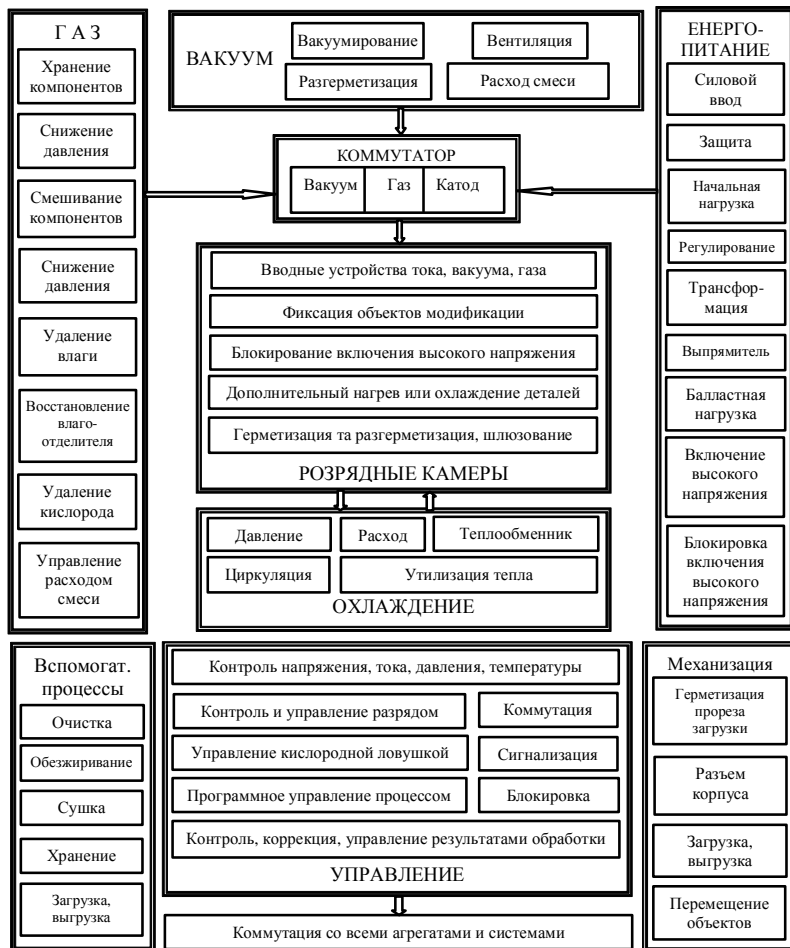


Рис. 3.6. Функции отдельных систем установок для БАТР и их взаимосвязь

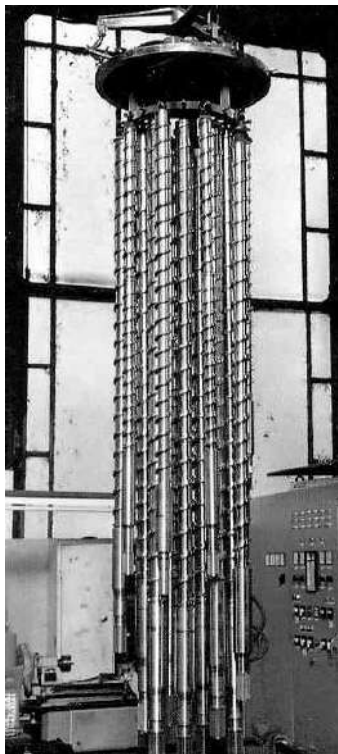
Выше отмечалось, что пионером и мировым лидером в проектировании и изготовлении установок для азотирования и карбонитрирования является немецкая фирма Klöckner-Ionon GmbH. Выпускаемое ею оборудование имеет широкий диапазон, как по размерам камер, так и мощности разряда (некоторые данные по рекламным материалам фирмы приведены в табл. 3.1), причем установки могут быть трех конструктивных схем: К-

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*

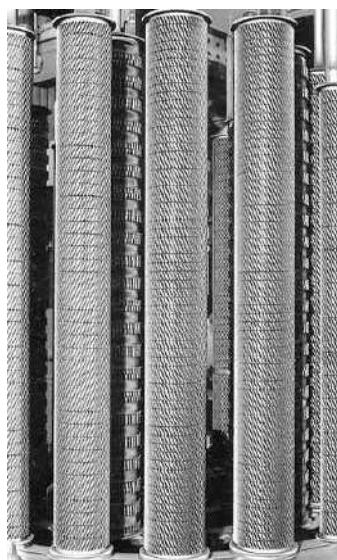
комбинированной, S – шахтной, H – колпаковой (числа после обозначения типа камеры указывают последовательно на диаметр и рабочую высоту камеры в мм). Показательно, что гамма типоразмеров установок, выпускаемых фирмой позволяет обрабатывать практически все виды деталей разных размеров. На

рис. 3.7 показана загрузка садки, состоящей из шнеков термопластавтоматов различной длины, на рис. 3.8 – применение процесса в массовом производстве зубчатых колес.

В России установки ионного



*Рис. 3.7 Загрузка шнеков в установку S 750/4500*



*Рис. 3.8. Садка зубчатых колес*

азотирования разрабатывались во ВНИИЭТО, некоторые менее распространенные типы – в МВТУ им Н. Э. Баумана (типа ИОН, совместно с Пермским НИТИ). Характеристики некоторых из них приведены в табл. 3.2. Система маркировки (кроме ОКБ и ИОН) включает цифровые блоки, разделенные точкой или тире, которые кодируют соответственно диаметр и высоту камер в дециметрах. Буква Г в обозначении соответствует колпаковым печам, Ш – шахтным, установки ОКБ при диаметре 960 мм могли за счет разного количества секций иметь высоту от 1220 до 2400 мм.

Таблица 3.1

**Технические характеристики некоторых установок фирмы  
Klöckner-Ionon GmbH**

Тип	Мощность, кВт	Масса садки, кг	Тип	Мощность, кВт	Масса садки, кг
Н 400/400	40	150	К 1800/2000	450	1200
Н 500/500	60	250	С 2000/3600	1000	5000
Н 1600/1000	100	500	Н 1800/1600	360	6000

Таблица 3.2

**Технические характеристики установок, выпускаемых в России**

Тип	НГВ 6.6	ОКБ 1566	НШВ 20-24	НШВ 28.7	НШВ 9.18
Мощность, кВт	40	170	450	450	170
Масса садки, кг	50	500	2500	1000	500

В КНР выпускаются установки мощностью от 10 до 500 кВт, с током разряда от 10 до 500 А, диаметром от 360 до 1700 мм и высотой рабочего пространства до 4000 мм. Масса садки – до 4000 кг [1]. Установки болгарского производства имеют мощность от 15 до 645 кВт, объем камер от 0,1 до 40 м<sup>3</sup>, допускают массу садки от 20 до 12000 кг [2].

В Украине установки для азотирования в безводородных газовых средах проектировались и выпускались малыми сериями и опытными образцами в ПНФТЦ ХНУ. Их параметры приведены в табл. 3.3. В коде обозначения установок серий ИПА первое число указывает на количество камер, далее диаметр и высота рабочего пространства в дециметрах. Установки типа ИПАС модульной конструкции могли выпускаться с числом камер от одной до трех.

Современные тенденции в производстве оборудования для обработки деталей в тлеющем разряде состоят в следующем:

- увеличение единичной массы садки, соответственно размеров разрядных камер и мощности источника энергопитания;

- применение пульсирующего питания, упрощающего процесс, особенно в части загрузки и наличия концентраторов, но снижающими эффективность;

- компоновка установок по схемам многокамерных;

- для длинномерных деталей используются шахтные печи, заглубляемые в пол, для остальных с целью упрощения доступа к садке – колпакового типа, причем корпус камеры поднимается и опускается внутрицевыми грузоподъемными устройствами;

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*

- системы газоподготовки позволяют точно обеспечивать соотношение компонентов и их количество;
- системы управления снабжаются эффективными автоматическими дугогасящими устройствами;
- в установках применяются многослойные теплозащитные экраны, уменьшающие потребляемую для нагрева садки мощность;
- наряду с преимущественно применяемыми вертикальными камерами могут использоваться горизонтальные с тележками;
- все более широко внедряются комбинированные процессы как в одной камере, так и во многокамерных установках;
- управление процессом как правило программное с отслеживанием параметров режима и их коррекцией.

Таблица 3.3

**Технические характеристики установок для безводородного азотирования в тлеющем разряде**

Характеристика	Тип установки								
	УАТР-4	УАТР-63	ИПА-20	ИПА-3106	ИПА-11011	ИПА-1918	ИПАС-21012	ИПА-188	ИПА-288
Мощность разряда, кВт	5	63	20	63	63	160	63	63	63
Диаметр камеры, мм	450	750	550	1000	1000	900	1000	800	800
Рабочая высота камеры, мм	480	800	450	600	1100	1800	1200	800	800
Число камер	1	1	1	3	1	1	2	1	2
Максимальное напряжение, В	1000	1200	1200	1200	1200	850	1200	1200	1200
Максимальный ток разряд, А	4	40	15	40	40	100	40	40	40
Минимальное давление, Па	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
Необходимая площадь, м <sup>2</sup>	9	18	12	28	12	30	18	12	18

**ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК**

1. Фан Дун-ли Ионная химико-термическая обработка в КНР// МиТОМ, 1992. №6. С. 17-19.
2. Арзамасов Б. Н., Братухин А. Г., Елисеев Ю. С., Панайоти Т. А. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: Из-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 1999. 400 с.

**3.2 Анализ конструктивных схем установок**

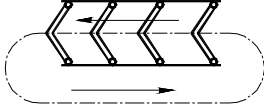
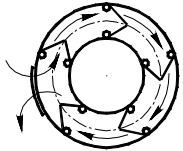
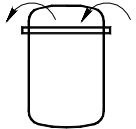
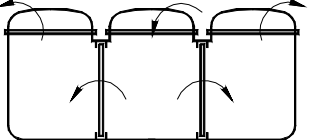
Анализ возможных схем установок представлен в табл. 3.4.

Таблица 3.4

**Классификация конструктивных схем установок для азотирования в тлеющем разряде**

Код	Критерий	Типы, схемы, преимущества и недостатки		
1	2	3		
1	Характер действия	1.1 Периодический	1.2 Последовательный	1.3 Непрерывный
				
		Простота изготовления, индивидуализация режимов	Высокая производительность, наличие серийных затворов	Непрерывность процесса, высокая производительность, стабильность качества
		Малые производительность и загрузка персонала и оборудования	Сложность привода, ограничения в размерах камер, синхронизация фаз процесса	Проблема герметичности, отсутствие серийных шлюзов
1.1	Число камер	1.1.1 Однокамерные		1.1.2 Многокамерные
		Малая стоимость и занимаемая площадь, индивидуализация технологии	Производительность, равномерность загрузки во времени	
		Малая производительность, неравномерная загрузка оборудования и персонала по времени	Увеличенная стоимость и занимаемая площадь, сложность обслуживания	

1	2	3	
1.2, 1.3	Автономность зон	1.2.1, 1.3.1 Общие системы для всех зон	1.2.2, 1.3.2 Раздельные системы для зон
		Упрощение и снижение стоимости изготовления, меньшая площадь	Возможность проведения разных режимов в различных зонах
		Усложнение реализации комбинированных технологических режимов	Повышение стоимости изготовления и эксплуатационных затрат
1.1.2	Размеры камер	1.1.2.1 Однотипные	1.1.2.2 Разного размера
		Упрощение изготовления и обслуживания	Повышение стоимости изготовления, усложнение компоновки
		Нерациональная загрузка при разнотипной номенклатуре деталей	Рациональная загрузка при разнотипной номенклатуре деталей
1.1.2	Расположение камер	1.1.2.3 Рядное	1.1.2.4 Круговое
			
		Упрощение обслуживания грузоподъемными устройствами	Компактность расположения. однотипность связей с коммутаторами
		Разнотипность связей с коммутаторами	Необходимость в специальных грузоподъемных устройствах

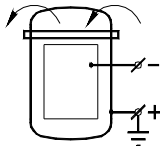
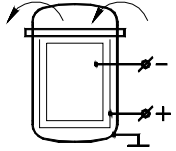
1	2	3	
1.3	Траектория движения	1.3.3 Линейная	1.3.4 Роторная
			
		Относительная простота конструкции шлюзов, компактность расположения	Уменьшение числа проемов для загрузки-разгрузки
		Увеличение размеров привода перемещения	Больше габаритные размеры
1.1.1	Число зон	1.1.1.1 Однозонные	1.1.1.2 Многозонные
			
		Простота и низкая стоимость изготовления	Возможность непрерывной работы с разными объектами последовательно
		Малый коэффициент использования, большие простои для охлаждения деталей	Сложность конструкции, повышенная стоимость изготовления и эксплуатации

1	2	3			
2	Начальное состояние активной среды	2.1 Газообразное	2.2 Жидкое		2.3 Пастообразное
		Простота подготовки газовой смеси	Компактность хранения и транспортировки		Удешевление оборудования за счет газовой системы
		Громоздкость при хранении и транспортировке	Необходимость в диссоциаторе, сложность регулирования		Сложность ввода в разрядную камеру
3	Состав газовой среды	3.1 Водородосодержащая		3.2 Безводородная	
		Снижение требований к герметичности, уменьшение потенциала катодной очистки, выше твердость поверхности		Отсутствие водородного охрупчивания, экологическая чистота, взрывобезопасность, пластичность поверхности	
		Экологическая опасность, взрывоопасность, сложность газовых систем для аммиака		Повышенные требования к герметичности, значительное напряжение катодной очистки	
4	Тип управления процессом	4.1 Ручное	4.2 Полуавтомат	4.3 Автомат	4.4 Программное
		Простота систем управления	Управление главными параметрами режима	Управление всеми параметрами процесса	Оперативная коррекция процесса, многостадийные режимы
		Неточность обеспечения параметров процесса	Возможность выхода некоторых параметров за пределы допустимых	Усложнение системы управления	Высокая стоимость. необходимость в достоверной модели


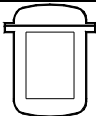
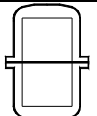
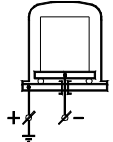
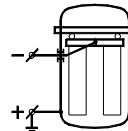
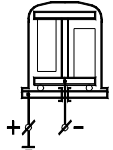


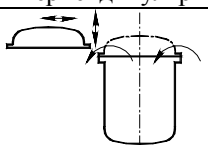
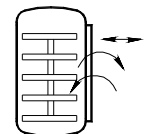
1	2	3		
5	Вид управления разрядом	5.1 Отсечка дугового	5.2 Стабилизация по току. напряжению или температуре	5.3 Комбинированное
		Простота устройства	Отслеживание отдельных параметров режима	Контроль нескольких или всех характеристик
		Сложность поддержки параметров режима	Несоответствие отдельных параметров режима	Усложнение систем контроля и анализа данных
6	Тип системы подготовки газовой среды	6.1 Ручная	6.2 Полуавтомат	6.3 Автоматическая
		Упрощение и снижение стоимости системы	Эффективность для установок со стабильными режимами	Изменение состава смеси в ходе процесса (в т. ч. программно)
		Необходимость в постоянном контроле и обслуживании, значительные перерывы подачи газа в ходе процесса	Значительный расход времени для подготовки порции смеси, необходимость в ресиверах больших размеров для обеспечения равномерности качества обработки	Сложность конструкции и настройки, повышенные требования к уровню подготовки персонала, необходимость в устройствах контроля

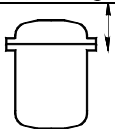

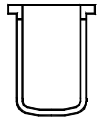
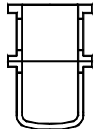
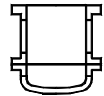
1	2	3		
7	Способ подготовки газовой смеси	7.1 По объему	7.2 По давлению	7.3 Струйные
		Точность состава смеси	Простота схемы, возможность реализации в ручном режиме	Непрерывность подачи газовой смеси с заданными характеристиками
		Усложнение системы дозирования компонентов	Сложность применения при больших давлениях	Сложность конструкции и регулирования
7.3	Тип процесса подготовки	7.3.1 Дискретный		7.3.2 Аналоговый
		Упрощение настройки		Непрерывность процесса
		Сложность работы при больших расходах		Неточность и нестабильность
8	Род тока питания электродов	8.1 Знакопостоянный		8.2 Знакопеременный
		Большая эффективность процесса		Меньше опасность перехода в дуговой
		Усложнение системы управления разрядом		Значительная стоимость мощных источников питания
8.1	Форма тока	8.1.1 Постоянный		8.1.2 Пульсирующий
		Большая эффективность. снижение уровня требований безопасности		Упрощение или отсутствие фильтров
		Громоздкость системы фильтров напряжения		Повышенное напряжение в линиях питания

1	2	3		
9	Подключение анода	9.1 Анод-корпус		9.2 Отдельный анод
				
		Упрощение коммутации, уменьшение числа токовводов		Снижение требований к чистоте обработки внутренних стенок корпуса
		Повышенные требования к чистоте обработки внутренних стенок корпуса		Увеличение числа вводов тока, опасность при пробое на корпус
10	Тип системы охлаждения	10.1 Водяная	10.2 Воздушная	10.3 Вакуумная
		Больше эффективность	Упрощение конструкции	Экономичность
		Повышенная стоимость	Неравномерность охлаждения	Небольшие температуры
10.1, 10.2	Наличие утилизации	10.1.1, 10.2.1 С утилизацией З		10.1.2, 10.2.2 Без утилизации
		Повышение экономичности		Упрощение конструкции
		Большая стоимость		Большой расход охладителя
10.1	Замкнутость цикла	10.1.3 С замкнутым циклом		10.1.4 Без циркуляции
		Снижение расхода воды		Малая стоимость системы
		Сложность системы. влажность в помещении		Неэффективное использование водных ресурсов

1	2	3	
11	Способ нагрева объектов	11.1 От собственно процесса	11.2 От дополнительных источников
		Упрощение нагрева и регулирования температуры, стабильность разряда	Снижение параметров тока разряда, управляемость локальными температурами
		Повышенный ток разряда в камере	Усложнение конструкции камеры
12	Способ контроля температуры	12.1 Бесконтактный	12.2 Контактный
		Упрощение системы, отсутствие пробоя высокого напряжения	Точность измерение. в т. ч. в местах локальных исключений
		Низкая точность и усредненность измерений	Опасность пробоя высокого напряжения
13	Положение камер	13.1 Вертикальное	13.2 Горизонтальное
		Компактность расположения, упрощение загрузки-разгрузки	Возможность применения в невысоких помещениях
		Необходимость в помещениях достаточной высоты	Сложность погрузочно-разгрузочных работ

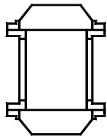
1	2	3		
14	Конструктивная схема камеры	14.1 Колпаковая	14.2 Шахтная	14.3 Комбинированная
				
		Надежность установки объектов в камере	Упрощение загрузки, малый ход крышки	Меньше величина хода крышки в сравнении с 14.1
		Большая высота подъема корпуса	Неудобство очистки при большой высоте	Необходимость в специальных подвесках
15	Способ установки объектов	15.1 На столе	15.2 На подвеске	15.3 Комбинированный
				
		Возможность обработки тяжелых деталей, упрощение подключения катода	Обработка большого количества объектов сравнительно небольших размеров	Универсальность применения
		Применение для одиночных объектов	Сложность изоляции подвески от корпуса	Увеличение стоимости оборудования

1	2	3	
16	Расположение проема для загрузки	16.1 Перпендикулярно оси	16.2 Параллельно оси
			
		Возможность механизации загрузки и разгрузки объектов обработки	Удобство формирования садок с малыми незафиксированными деталями
		Сложность загрузки садки с незафиксированными объектами	Практически невозможность механизации погрузочно-разгрузочных работ
17	Вид привода люка проема	17.1 Ручной винтовой или рычажный	17.2 Электромеханический
		Простота конструкции, приемлемость при нечастом использовании	Отсутствие дополнительных систем, возможность применения и для разъема корпуса
		Отсутствие механизации	Значительная длина ходовых винтов
		17.3 Пневматический	17.4 Гидравлический
		Простота среди средств механизации	Значительные усилия при малых размерах
Большие размеры цилиндров	Необходимость в дополнительных системах		

1	2	3		
18	Плоскость разъема корпуса	18.1 Диаметральная		18.2 Осевая
				
		Простая система герметизации стыка Однокамерные схемы установок		Возможность многопозиционных схем Сложность конструкции герметизации
		18.2.1 Однопозиционные		18.2.2 Многопозиционные
18.2	Число постов	Относительная простота конструкции, удобство доступа к объектам		Применение для мелких деталей с большим временем формирования садки
		Сложность конструкции в сравнении с 18.1		Наибольшая сложность конструкции
		19.1 Сплошная		19.2 Секционная
19	Конструк- ция корпуса камеры			
		Простота конструкции	Применение при большой длине	Доступ к столу и нижнему токовводу
		Сложность обработки при большой длине	Увеличение количества стыков герметизации	Увеличение стоимости с сравнении с 19.1

1	2	3		
19	Конструкция охлаждения камеры	19.4 Одностеночные без охлаждения	19.5 С двумя стенками	19.6 С трубчатым охладителем
				
		Эффективность охлаждения	Малая стоимость камер	Снижение веса камеры
		Низкая рабочая температура	Сложность конструкции	Неравномерное охлаждение
		19.7 С охлаждаемыми крышкой и дном	19.8 Без охлаждения крышки и дна	
				
		Высокотемпературные режимы работы	Упрощение системы охлаждения	
		Усложнение системы охлаждения	Опасность нагрева поверхностей крышки	



1	2	3		
19	Форма поперечного сечения камеры	19.9 Круглая		19.10 Прямоугольная (квадратная)
		Уменьшение длины сварных швов, надежность герметичности		Рациональность использования объема камеры для массивных прямоугольных объектов обработки
		Неравномерность поля при массивных прямоугольных объектах обработки		Усложнение изготовления (увеличение длины швов, обработка фланцев)
20	Форма крышки и дна	20.1 Эллиптическая	20.2 Коническая	20.3 Плоская
				
		Рациональность формы для вакуумных камер	Отсутствие необходимости в специальных заготовках	Простота конструкции и обработки
		Необходимость в специальных комплектующих	Погиб диска, увеличение длины сварных швов	Необходимость оребрения диска

### **3.3. Проектирование систем установок для АТР**

#### **3.3.1. Разрядные камеры**

##### **3.3.1.1. Классификация конструктивных схем камер.**

Разрядные камеры, о которых идет речь в этом разделе, применяются для реализации ВДГРТ модификации поверхности металлов и металлических сплавов за счет электрического разряда в газовой среде при низком давлении.

Критерии классификации, которые выбираются в соответствии с задачами исследований, в данном случае приспособлены к разработке инженерных методик проектирования разрядных камер как основной части оборудования для ВДГРТ модификации поверхности металлов.

1. По положению продольной оси камеры: 11 - с вертикальной осью, 12 - с горизонтальной, 13 - с наклонным положением оси.

2. По типу схемы загрузки камеры: 21 - с загрузкой через проем в верхней части камеры (шахтные камеры), 22 - то же, через нижний проем (камеры колпакового типа), 23 - то же через боковой проем (дверные камеры).

3. По количеству секций, из которых составляется корпус камеры: 31 - сплошные (односекционные), 32 - многосекционные.

4. По конструкции торцевых частей: 41 - с торцевой частью эллиптического типа, 42 - с конической торцевой частью, 43 - с плоской торцевой частью и усилением (например - с помощью ребер жесткости), 44 - с плоской торцевой частью без усиления, 45 - со сферической торцевой частью.

5. По типу соединения корпуса камеры с нерабочими торцевыми частями: 51 - с неотъемными частями, 52 - с частями, которые могут сниматься.

6. По типу системы охлаждения: 61 - с водным охлаждением, 62 - с воздушным охлаждением, 63 - с вакуумной термоизоляцией, 64 - с минеральной термоизоляцией.

7. По конструкции грузонесущего устройства: 71 - с закреплением садки на подвеске, 72 - с установкой садки на столе, 73 - с комбинированным грузонесущим устройством.

8. По конструкции анода: 81 - с отдельным анодом, который не изолирован от корпуса, 82 - с анодом, в качестве которого выступает корпус, 83 - с отдельным анодом, изолированным от корпуса.

9. Другие конструктивные признаки: 91 - с верхним вводом тока, 92 - с нижним вводом тока, 93 - с боковым вводом тока, 94 - с комбинированным расположением ввода тока, 95 - с нагреванием от

разряда, 96 - с комбинированным нагревом от разряда и дополнительного нагревателя, 97 - с одной стенкой корпуса, 98 - с двумя стенками корпуса, 99 - с дополнительным охлаждением торцевых частей.

Таким образом, на основе приведенной классификации может быть составлена формула любой конструктивной схемы, например: 1121314351617182939598 является описанием вертикальной разрядной камеры шахтного типа, односекционной, с плоской торцевой частью, усиленной ребрами, с неотъемным дном, с водяным охлаждением, грузонесущее устройство типа подвески, с корпусом-анодом, в камере установлен боковой токоввод, нагревание садки происходит только за счет разряда, корпус - с двумя стенками. Следует заметить, что формула в зависимости от объема информации, выбранной в качестве существенной в каждом конкретном случае, может быть короче. Кроме того, когда гарантировано используются все классификационные критерии, возможна значительно более короткая форма записи формулы конфигурации. В этом случае порядковые номера критериев не записываются, например, для вышеупомянутой схемы формула будет иметь вид 11131112358.

#### **3.3.1.2. Формирование размеров разрядных камер.**

Внутренние размеры камеры могут быть определены как габаритные и номинальные. Более подробно расчет параметров, непосредственно предопределяющих производительность установки, будет рассмотрен в главе 4 [1].

К внутренним габаритным размерам относятся: внутренний диаметр корпуса; внутренний размер вдоль оси камеры. Габаритные внутренние размеры в основном используются для определения внутреннего объема камеры, который, в свою очередь, служит отправной точкой при проектировании некоторых систем установок, например, вакуумной, охлаждения и т.п.

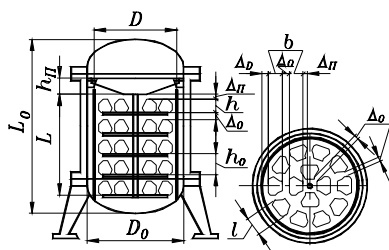
Внутренние номинальные размеры - номинальный диаметр, определяемый как внутренние диаметры анода, или при его отсутствии (схема 82) - корпуса камеры; номинальный осевой размер, который измеряется от верхней плоскости стола или от базовой поверхности подвески к допустимой точке противоположной торцевой поверхности для вертикальных камер и между допустимыми точками противоположных торцевых частей для горизонтальных и наклонных камер. Допустимая точка определяется формой противоположной торцевой части, конфигурацией установочного пространства объекта модификации и расположением его относительно оси камеры.

Обозначение размерного кода разрядной камеры состоит из

упрощенных кодов номинальных диаметров и осевого размера, например, размерный код 1012 соответствует разрядной камере с номинальным диаметром  $D=1000$  мм и осевым размером  $L=1200$  мм.

Расчет главных размеров разрядной камеры может быть проектным, когда они определяются с целью разработки оборудования для реализации заданной программы обработки деталей, и проверочным в случае необходимости обработки деталей на существующем оборудовании. Проектному расчету должна предшествовать разработка структурной схемы установки для модификации поверхности деталей [1].

Величина садки, определяемая как количество объектов модификации в одной загрузке, устанавливается, прежде всего, учитывая программу модификации, проверяется по грузоподъемности подвески (для схем 71 и 73), активной площади объектов модификации и энергетической способности источника питания, возможности группирования объектов, их габаритных размерах. Детально методики этих проверок изложены в главе 4, а



*Рис. 3.9. Схема для определения величины садки в разрядной камере*

также в [1]. Наиболее точно величина садки из условия габаритных размеров объектов определяется компоновкой в номинальном пространстве, ограниченном номинальными размерами камеры (рис. 3.9). На примере разрядной камеры шахтного типа с подвеской, торцевыми эллиптическими частями (формула конструктивной схемы 1121417181) величина

садки может устанавливаться двумя методами.

В общем случае в одной садке могут обрабатываться разнотипные детали, хотя при этом возможны сложности с подбором параметров технологического режима, который обеспечивал бы необходимые конечные результаты, поэтому такой ситуации по возможности следует избегать. Применяя понятие установочного пространства, определяемого для каждого типа деталей как произведение габаритных размеров детали  $l$ ,  $b$ ,  $h$ , к которым прибавляются в зависимости от положения детали в номинальном пространстве размеры дистанций:  $\Delta_D$  – дистанция между катодом (деталью) и анодом,  $\Delta_0$  – дистанция между объектами, устанавливаемая из условий недопущения разряда с полым катодом, локального перегрева объектов, неравномерности показателей

результатов модификации и т.п. (эта дистанция учитывается для одной детали в половинном размере),  $\Delta_{\Pi}$  – дистанция между деталями и подвеской (см. главу 2). В таком варианте величина садки определится (для садки из разнотипных деталей,  $i$  – количество типов обрабатываемых деталей)

$$z_c = V_K / \sum_1^i z_{ci} \cdot V_{oi}, \quad (1)$$

где  $V_K$  – объем внутреннего рабочего пространства камеры,  
 $V_o$  – объем установочного пространства одного объекта.

Полученное значение величины садки  $z_c$  проверяется из условия кратности соотношения внутренних размеров рабочего пространства разрядной камеры к габаритным размерам объектов модификации

$$z_c = trunc\left(\frac{\pi D_A^2}{4A_D}\right) \cdot trunc\left(\frac{L_A}{h}\right), \quad (2)$$

где  $D_A$  – диаметр активной зоны камеры,  $D_A = D - 2\Delta_D$ , ( $D$  – внутренний номинальный размер камеры,  $\Delta_D$  – дистанция между деталями и анодом),

$L_A$  – длина активной зоны камеры,  $L_A = L - h_{\Pi} - \Delta_L$ , ( $L$  – номинальная длина камеры,  $h_{\Pi}$  – длина подвески или высота подиума,  $\Delta_L$  – сумма дистанций в осевом направлении между деталями и анодом, между деталями и подвеской и между деталями),

$A_D$  – площадь проекции установочного пространства объекта на плоскость, перпендикулярную оси камеры; для деталей приблизительно симметричных в плане  $A_D = 0,25 \cdot \pi D_z^2$ ,  $D_z$  – условный габаритный размер установочного пространства объекта модификации в радиальном измерении,  $D_z = d_0 + 0,5\Delta_0$ ,  $d_0$  – габаритный размер объекта в радиальном направлении,

*trunc* – функция приведения результатов вычисления выражения в скобках к ближайшему меньшему целому.

Внутренний номинальный диаметр меньше внутреннего габаритного диаметра на величину зазора, определяемого конструктивно из условия возможности монтажа анода (схема 81) или конструкцией изоляторов анода (схема 83).

Другая методика, базирующаяся на компоновке деталей в номинальном пространстве, используется для серийного производства при установившейся программе обработки. В этом случае с соблюдением необходимых дистанций детали компонуются в диаметральной плоскости, количество их  $z$  соответствует возможному количеству деталей на одном ярусе подвески (многоярусные схемы загрузки характерны для грузонесущих

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
 органов в виде подвески или комбинированных, схемы которых 71 и 73). Величина садки в этом случае

$$z_c = z_D L / h_0 \quad (3)$$

Указанные выше дистанции предварительно можно принимать в пределах 30...60 мм, тем не менее, рекомендуется при условии более или менее установившейся программы обработки определить их экспериментально. Условием приемлемости дистанции есть критерий неравномерности температуры поверхности детали в зонах, которые взаимно не экранируются двумя деталями или системами деталь-анод или детали-подвеска, и такими, где это экранирование имеет место (см. главу 2).

В варианте проектного расчета задача решается в обратном порядке, т.е. после определения на основе заданной программы обработки величины садки по известной номенклатуре обрабатываемых деталей подбираются номинальные размеры камеры и конструктивная схема всей установки [1].

**3.3.1.3. Проектирование главных элементов камеры.** Комплексная расчетная схема разрядной камеры с корпусом,

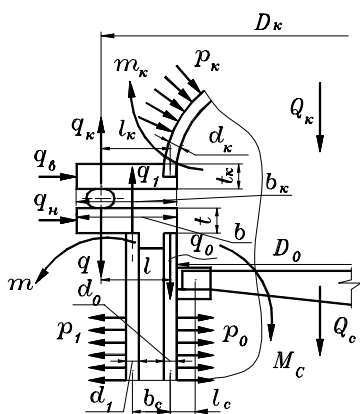


Рис. 3.10. Расчетная схема элементов разрядной камеры

который имеет две стенки, показана на рис. 3.10. Эта схема относится к наиболее распространенным, разрядная камера состоит из крышки, контактирующей через фланец и герметичный стык с корпусом. Обе стенки корпуса соединены фланцем, предоставляющим конструкции дополнительную жесткость. Крышка находится под равномерно распределенным атмосферным давлением  $p_K$ , результирующая сила которого

$$Q_K = \frac{\pi D_K^2}{4} p_K, \quad (4)$$

где  $D_K$  – расчетный диаметр герметизации стыка,  $D_K = D_0 + 2l$ .

В связи с тем, что в общем виде этот диаметр не совпадает с краем оболочки крышки, возникает краевой момент с интенсивностью  $m_K = q_K l_K$ , где линейные нагрузки

$$q_K = -q = Q_K / \pi D_K = 0,25 D_K p_K. \quad (5)$$

На корпус разрядной камеры по герметичному стыку действует равномерно распределенная линейная нагрузка, интенсивность которой  $q$ . Внешняя стенка сжата линейной нагрузкой  $q_1$ , кроме того на нее действует внутреннее давление системы охлаждения  $p_1$ . На внутреннюю стенку действует линейная нагрузка осевого направления интенсивностью  $q_0$ , внешнее давление системы охлаждения  $p_0$ , который превышает  $p_1$  на величину атмосферного давления, и локально приложенные реакции в местах соединения опорных элементов подвески с внутренней стенкой, определяемых как  $0,5Q_C$ . Следует заметить, что линейная нагрузка  $q_0$  может быть как растягивающей, так и сжимающей в зависимости от положения точки герметизации (размер консоли  $l$ ), а также от соотношения жесткостей стенок, зависящих от их толщин  $d_1, d_0$ .

Развернутая теория расчета тонкостенных конструкций изложена во многих работах, например [2...5]. Тем не менее, даже упрощенные расчеты на прочность демонстрируют, что они не имеют определяющего характера. Действительно, напряжения сжатия во внешней стенке корпуса, воспринимающей даже всю нагрузку от крышки (для конструкции с одной стенкой или при условии, что точка герметизации расположена по оси внешней стенки), определяются

$$\sigma_c = \frac{Q_k}{\pi(D_0 + 2b_c + 0,5d_0)d_1} \quad (6)$$

Учитывая, что для обозначенных выше условий  $b=l, d_0 \ll D_0$ , и приняв для примера  $D_0=1000$  мм,  $l=40$  мм, получим

$$\sigma_c = \frac{(D_0 + 2l)^2 p_k}{4(D_0 + 2l)d_1} = \frac{p_k (D_0 + 2l)}{4d_1} = 3,4 \text{ МПа} \ll [\sigma_C], \quad (7)$$

при этом толщина стенки может не превышать 0,3 мм.

Таким образом, определяющим для большинства элементов является расчет на устойчивость. С целью упрощения методик расчетов и создания условий для их приемлемости в инженерной практике сборочные единицы разбиты на отдельные конструктивные элементы. Некоторая не учтенная при этом дополнительная жесткость, предоставленная соединениями этих элементов, отрицательно компенсируется неточностью изготовления, что является следствием технологии производства камер (свертывание листовых деталей, деформации в результате сваривания, размеры которых одного порядка с толщинами стенок). Последний фактор наиболее существенен с точки зрения устойчивости конструкции.

Линейные нагрузки осевого направления, действующие на стенки корпуса, упрощенно (без учета жесткости стенок как опор)

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
определяются

$$q_1 = ql/b_c = qK_{lb}, \quad q_0 = q - q_1, \quad (8)$$

где  $K_{lb}$  -отношение консоли нагрузки на фланце к расстоянию между стенками.

**Внешняя стенка корпуса** работает при одновременном действии сжимающих напряжений осевого направления, напряжений изгиба от внутреннего давления и от локального краевого момента. Первые два факторы учитываются [4, с.132]

$$\frac{Q_1}{Q_{1KP}} + \frac{p_1}{p_{1KP}} = 1, \quad (9)$$

где  $Q_1$  – полная осевая сила, действующая на внешнюю стенку,  
 $Q_1 = \pi q_1 (D_0 + 2b_c)$ ,

$Q_{1KP}$  – критическое значение полной осевой силы,

$p_{1KP}$  – критическое значение внутреннего давления.

Ориентировочно расчетное значение внутреннего давления в системе охлаждения можно принимать  $p=0,3$  МПа для водяного охлаждения и  $p=0,05$  МПа для воздушного охлаждения.

Критическое значение полной осевой силы (Н) [4, с.38] (формула трансформирована соответственно единицам измерения, принятым в этой работе)

$$Q_{1KP} = 0,2 \cdot 8 \sqrt{\left(\frac{100d_1}{R_1}\right)^3} E_1 d_1^2, \quad (10)$$

где  $R_1$  – радиус срединной поверхности внешней стенки,  
 $R_1 = 0,5(D_0 + d_0 + 2b_c)$ ,

$E_1$  – модуль упругости материала, из которого изготовлена внешняя стенка, ГПа.

Для стали 15 при  $E_1=196$  ГПа,  $R_1=1000$  мм,  $d_1=2$  мм  $Q_{1KP}=139831$  Н. В то же время сила давления крышки на корпус составляет  $Q_K=91562$  Н, т.е. толщина стенки теоретически может не превышать 2 мм. Очевидно, что такая ситуация при отсутствии внутреннего давления могла бы иметь место для идеальных оболочек, например, точеных или предварительно напряженных вытяжкой в точных пресс-формах. Действительно составляющая под корнем формулы (10) предусматривает высокое качество изготовления оболочки. Реально же при изготовлении оболочек методом свертывания листов толщиной 8 мм отклонение по образующей цилиндра колеблется в пределах 2...3 мм, достигая значений 5 мм, т.е. деформация срединной поверхности одного



порядка с толщиной стенки.

Относительно действия краевого момента, то его влияние учитывается только для коротких оболочек, а именно таких, которые имеют длину  $L_k < 2,2(Rd)^{0,5}$ , что для оболочки радиусом порядка 1000 мм и с толщиной стенки 8 мм составляет 139 мм. Даже если оболочка корпуса имеет с обеих торцевых сторон фланцы, которые жестко не связаны с дном и крышкой, то краевые моменты могут учитываться при длине оболочки меньше 280 мм. Такие короткие корпуса практически не применяются, поскольку эта величина одного порядка с размерами подвески, стола и т.п.

Критические напряжения, при которых оболочка теряет устойчивость (без индексов места установки оболочки)

$$\sigma_{1KP} = K_{\sigma} E d_1 / R_1, \quad (11)$$

где  $K_{\sigma}$  – коэффициент пропорциональности. С учетом данных, приведенных в [2, т. 3, с. 141], а также рекомендаций (там же) относительно уменьшения коэффициента пропорциональности приблизительно в два раза для оболочек, изготовленных с низкой точностью, и необходимости перевода в единицы измерения, принятые в этой работе (модуль упругости – в ГПа, напряжение – в МПа), точное значение коэффициента пропорциональности для соотношения  $K_{Rd} = R/d$  в диапазоне от 0 до 1500 может определяться

$$K_{\sigma} = 90 - 0,01K_{Rd} - 0,00007K_{Rd}^2 + 4 \cdot 10^{-8} K_{Rd}^3 \quad (12)$$

С достаточной точностью коэффициент пропорциональности для  $K_{Rd} = 0 \dots 800$  (этот диапазон значений приемлем для реальных камер) может определяться также по упрощенной зависимости

$$K_{\sigma} = 90 - 0,00005K_{Rd}^2 \quad (13)$$

Действующие напряжения, исходя из условия наиболее неблагоприятного случая, когда напряжения сжатия  $\sigma_{C1}$  складываются с напряжениями изгиба от нецентрального приложения нагрузки на фланец  $\sigma_{bq1}$  и с напряжениями изгиба  $\sigma_{b\delta 1}$ , связанными с деформациями стенки в результате технологических особенностей изготовления

$$\sigma_{F0} = \sigma_{C1} + \sigma_{bq1} + \sigma_{b\delta 1} = \frac{q_1}{d_1} + \frac{6q \cdot |l - b_c|}{d_1^2} + \frac{6q_1 \delta}{d_1^2} \leq \sigma_{1KP}, \quad (14)$$

где  $\delta$  – возможное отклонение образующей оболочки от прямолинейности, согласно приведенным выше данным можно принимать  $\delta = 4 \dots 5$  мм.

Проверка по формуле (14) моделирует ситуацию, когда камера находится под вакуумом, но система охлаждения выключена. Внутреннее давление в принципе положительно влияет на

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
 устойчивость оболочки, поскольку деформация стенок корпуса при потере им устойчивости происходит всплеском с выпуклостью в середину камеры, чему препятствует внутреннее давление. Этот фактор учитывается введением в формулу (11) вместо  $K_\sigma$  скорректированного коэффициента пропорциональности  $K_{\sigma p}$ , который определяется на основе данных, приведенных в [2, т. 3, с. 152], и с учетом пояснений после формулы (11)

$$K_{\sigma p} = 90 + 0,7\bar{p} - 0,00025\bar{p}^2, \quad (15)$$

где  $\bar{p}$  - безразмерный параметр давления,  $\bar{p} = K_v \left( \frac{P_1}{E_1} \right) K_{Rd}^2$ ,

$$K_v = \sqrt{3(1 - \nu^2)}, \nu - \text{коэффициент Пуассона, при } \nu=0,3 \quad K_v=1,652.$$

Очевидно, что поскольку с увеличением давления и отношения радиуса оболочки к толщине стенки скорректированный коэффициент пропорциональности  $K_{\sigma p}$  значительно возрастает, а коэффициент пропорциональности  $K_\sigma$  наоборот в значительной степени уменьшается при одинаковых начальных значениях, то решающее значение имеет проверка толщины стенки по формулам (11, 14). Следует при этом заметить, что использование этих зависимостей допустимо при условии нахождения длины корпуса камеры в пределах [2, т.3, с. 138]

$$1,38 \sqrt{\frac{1}{K_{Rd}}} < \frac{L_K}{R} < 0,57 \sqrt{K_{Rd}}, \quad (16)$$

что при  $R=1000$  мм и  $K_{Rd}=100$  соответствует диапазону длин  $L_K=138...5700$  мм, т.е. методика может применяться практически для всех реальных конструкций камер.

Для упрощения пользования изложенной выше методикой проектирования оболочек внешних стенок камер выбор толщины стенки может выполняться по рис. 3.11, при этом учтенные физико-механические показатели материала стенки соответствуют сталям Ст3, 08кп, 15. Все графики являются решением уравнения, вытекающего из формул (14) и (13)

$$0,25 p_K (D_0 + 2b_c K_{ib}) \left( \frac{K_{ib}}{d_1} + \frac{6}{d_1^2} (b_c |K_{ib} - 1| + K_{ib} \delta) \right) = \quad (17)$$

$$= \left( 90 - \frac{0,00005(D_0 + 2b_c)^2}{4d_1^2} \right) \frac{2E_1 d_1}{D_0 + 2b_c}$$

Размер расстояния между стенками, который обеспечивал бы нормальные условия для работы системы охлаждения как водяного, так и воздушного типов, задавался, исходя из практики

конструирования камер в пределах 15...40 мм (в зависимости от номинального диаметра камеры). Диапазон внутренних габаритных диаметров камеры принят в пределах 600...1400 мм, что тоже

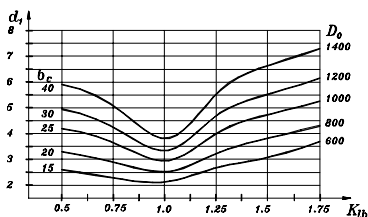


Рис. 3.10. Выбор толщины внешней стенки разрядной камеры

соответствует наиболее употребляемым типоразмерам оборудования.

**Внутренняя стенка корпуса** камеры находится под влиянием сжимающей линейной нагрузки  $q_0$  осевого направления и внешнего давления  $p_0$ . Совместное действие этих факторов учитывается уравнением

$$\frac{p_0}{p_{0KP}} + \frac{\sigma_{F0}}{\sigma_{0KP}} = 1, \quad (18)$$

где  $p_{0KP}$  и  $\sigma_{0KP}$  – критические значения внешнего давления и напряжений от осевого направления,

$p_0$  – действующее давление на внутреннюю стенку,  $p_0 = p + 0,1$ ,  
 $\sigma_0$  – действующие напряжения осевого направления.

Формулой (18) учитывается также то отрицательное обстоятельство, что направление действия давления совпадает с направлением образования вмятин при потере оболочкой устойчивости - к центру кривизны.

Критические значения напряжений осевого направления определяются по аналогии с (11)

$$\sigma_{0KP} = K_\sigma E d_0 / R_0, \quad (19)$$

где  $R_0$  – радиус срединной поверхности внутренней стенки,  $R_0 = 0,5(D_0 + d_0)$ .

Действующие напряжения осевого направления в варианте наиболее невыгодной ситуации определяются как сумма напряжений от линейной осевой нагрузки  $\sigma_{C0}$ , напряжений изгиба  $\sigma_{bq0}$  от нецентрального приложения нагрузки на фланец, напряжений изгиба  $\sigma_{b\delta 0}$ , связанных с деформациями стенки в результате технологических особенностей изготовления и напряжений изгиба  $\sigma_{bC}$  от локального момента  $M_C$  в месте установки опоры подвески

$$\begin{aligned} \sigma_{F0} &= \sigma_{C0} + \sigma_{bq0} + \sigma_{b\delta 0} + \sigma_{bC} = \\ &= \frac{q_0}{d_0} + \frac{1,5q(b_c - l)}{d_0^2} + \frac{6|q_0 \delta|}{d_0^2} + \frac{0,62Q_C l_C}{r z_0 d_0^2}, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $Q_C$  – сила веса садки и подвески, Н,

$r$  – радиус локальной площадки, в пределах которой прикладывается локальный момент,  $r=40...70$  мм,

$z$  – количество опор подвески, как правило – две, для очень больших садок может быть три, четыре не применяется в связи с отсутствием гарантии равномерного распределения нагрузки на все опоры.

Решающим в практических расчетах оболочек, нагруженных внешним давлением, есть верхнее значение внешнего критического давления [2, т. 3, с. 142, 146], которое уменьшается на величину  $K_\alpha$ , зависящую от соотношения радиуса срединной поверхности к толщине стенки  $K_{Rd}$

$$P_{0KP} = K_\alpha K_P E_0 / K_{Rd}^2, \quad (21)$$

где  $K_P$  – коэффициент пропорциональности для определения критического значения давления,

$E_0$  – модуль упругости материала, из которого изготовлена внутренняя стенка.

Коэффициент пропорциональности для определения критического давления зависит от соотношений радиуса срединной поверхности к толщине стенки  $K_{Rd}$  и длины стенки к радиусу  $K_{LR} = L_K / R_0$

$$K_P = 920 / K_{LR} \sqrt{K_{Rd}} \quad (22)$$

Зависимость величины  $K_\alpha$  от коэффициента  $K_{Rd}$  по данным [2, т. 3, с. 146] устанавливается по формуле

$$K_\alpha = 0,75 - 0,00025 K_{Rd} \quad (23)$$

Аналогично предыдущему толщину внутренней стенки можно выбирать по рис. 3.12, 3.13, при этом графические зависимости построены на основе конечного уравнения, полученного с учетом формул (18) - (21)

$$A + B - 1 = 0, \quad (24)$$

где  $A, B$  – выражения,

$$A = P_0 / \left( 0,75 - 0,00025 \frac{D_0 + d_0}{2d_0} \right) \cdot \left( 920 E_0 / K_{LR} \sqrt{\left( \frac{D_0 + d_0}{2d_0} \right)^5} \right), \quad (25)$$

$$B = 0,25 P_K (D_0 + 2b_c K_{ib}) \left( \frac{1 - K_{ib}}{d_0} + \frac{6}{d_0^2} \left( \frac{b_c (1 - K_{ib})}{4} + |1 - K_{ib}| \delta \right) \right) + \frac{0,62 Q_c l_c}{r z_0 d_0^2} \times \quad (26)$$

$$\times 1 / \left( 90 - 0,00005 \frac{(D_0 + d_0)^2}{4d_0^2} \right) \frac{2E_0 d_0}{D_0 + d_0}$$

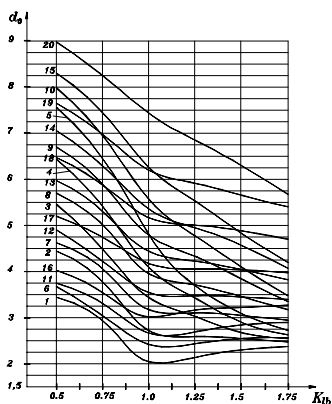


Рис.3.12. Выбор толщины внутренней стенки камер с водяным охлаждением  
 1-5 -  $K_{LR}=1$ ; 6-10 -  $K_{LR}=1,5$ ; 11-15 -  $K_{LR}=2$ ; 16-20 -  $K_{LR}=3$ ,  
 1, 6, 11, 16 -  $D_0=600$  мм; 2, 7, 12, 17 -  $D_0=800$  мм; 3, 8, 13, 18 -  $D_0=1000$  мм; 4, 9, 14, 19 -  $D_0=1200$  мм; 5, 10, 15, 20 -  $D_0=1400$  мм;

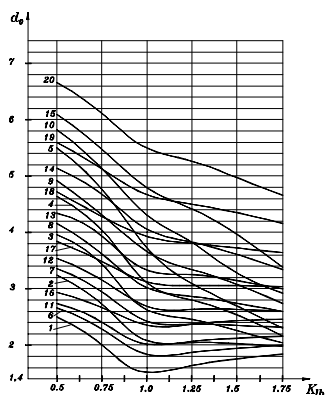


Рис.3.13. Выбор толщины внутренней стенки камер с воздушным охлаждением (обозначение графиков – аналогично рис. 3.12)

Сила веса садки задавалась, исходя из реальных данных эксплуатации установок, в зависимости от диаметра камеры и ее длины по формуле

$$Q_C = K_{LR}(800 - 1,25D_0 + H + 0,00195D_0^2) \quad (27)$$

Сопоставление данных с рис. 3.11, 3.12, 3.13 указывает на разный характер влияния на толщину стенок отношения консоли нагрузки на фланце к расстоянию между стенками  $K_{lb}$ . Если толщина внешней стенки сначала с ростом  $K_{lb}$  уменьшается, а в дальнейшем – возрастает, то толщина внутренней стенки в основном уменьшается. Такой характер изменения двух компонент корпуса дает возможность установить оптимум с точки зрения минимальной металлоемкости. Общая масса стенок будет при этом характеризоваться площадью сечения стенок в плоскости, перпендикулярной оси камеры

$$A_D = \pi((D_0 + 2b_c + d_0)d_1 + (D_0 + d_0)d_0) \quad (28)$$

Для удобства анализа применен показатель приведенной металлоемкости

$$q = A_{Di} / A_{D0} \quad (29)$$

где  $A_{Di}$ ,  $A_{D0}$  – площади сечения стенок камеры некоторого конструктивного исполнения и камеры, принятой в качестве модели для сравнения. На рис. 3.14 показаны результаты расчетов

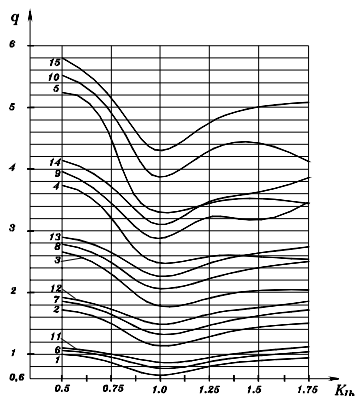


Рис. 3.14. Приведенная масса корпусов камер с водяным охлаждением (базовая модель для сравнения -  $D_0=600$  мм,  $K_{lb}=0,5$ ;  $K_{LR}=1$ )  
 1-5 -  $K_{LR}=1$ ; 6-10 -  $K_{LR}=2$ ; 11-15 -  $K_{LR}=3$ ; 1, 6, 11 -  $D_0=600$  мм; 2, 7, 12 -  $D_0=800$  мм; 3, 8, 13 -  $D_0=1000$  мм; 4, 9, 14 -  $D_0=1200$  мм; 5, 10, 15 -  $D_0=1400$  мм;

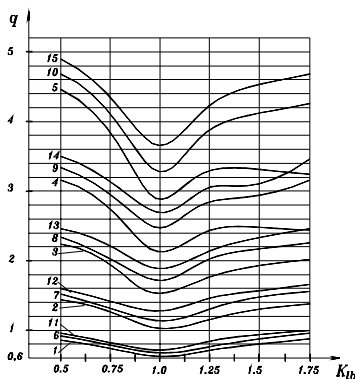


Рис. 3.15. Приведенная масса корпусов камер с воздушным охлаждением (Остальные параметры соответствуют рис. 1.14)

приведенной металлоемкости камер с водным охлаждением в диапазоне длин с коэффициентом отношения длины корпуса к его радиусу  $K_{LR}=1...3$ , причем в качестве модели для сравнения принята камера с  $D_0=600$  мм,  $K_{lb}=0,5$ ;  $K_{LR}=1$ . Рис. 3.15 отображает аналогичные данные для камер с воздушным охлаждением в том же диапазоне размеров и при той же модификации для сравнения. Рис. 3.16 отображает результаты расчетов для камер как с водным, так и с воздушным охлаждением при больших параметрах длины  $K_{LR}=4...6$ , причем в качестве модели для сравнения выбрана камера тех же размеров диаметра и длины с  $K_{lb}=0,5$ .

Из рис. 3.14, 3.15 и 3.16 следует, что для всех конструктивных типов разрядных камер существует четкий минимум металлоемкости, причем во всех случаях он соответствует коэффициенту отношения консоли нагрузки на фланце к расстоянию между стенками  $K_{lb}=1$ , что и следует рекомендовать как наиболее целесообразное. Именно для такого варианта конструкции в табл. 3.5 приводятся рекомендации по выбору толщин стенок разрядных камер разных типоразмеров. Таблица составлена для низкоуглеродистых сталей,

чаще всего используемых для изготовления корпусов (08, 15, Ст3 и т.п., модуль Юнга для них  $E=186...196$  ГПа). Расчетные значения в табл. 3.5 следует привести к ближайшим большим из стандартного ряда толщин ассортимента стального тонкостенного листа.

Графики на рис. 3.14 и 3.15 указывают также на то, что металлоемкость камер с воздушным охлаждением меньше в сравнении с водным охлаждением, для корпусов с  $K_{LR}=3$  эта разность достигает 18%. В случаях, когда давление в водяной системе гарантировано не превышает 0,05 МПа (например – в системах, оснащенных регуляторами давления, или самотечных, где используется только гравитационное давление), толщина внутренней стенки может выбираться как для систем с воздушным охлаждением. Следует также учесть, что в модели принята консольная схема передачи нагрузки от веса садки (рис. 3,10). При опоре непосредственно на верхний фланец или на дно результаты расчетов будут несколько иными.

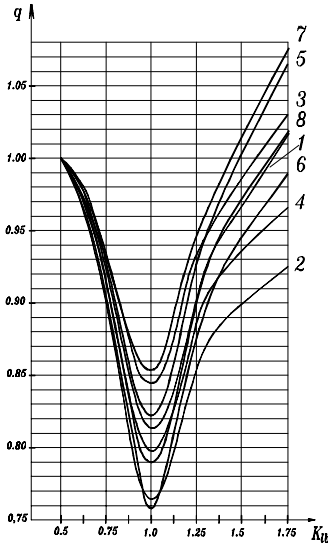
Таблица 3.5

**Расчетная толщина стенок корпуса разрядной камеры, мм**

$K_{LR}$	Назначение стенки/ /тип охлаждения		Толщина стенки при диаметре $D_0$				
			600	800	1000	1200	1400
1,0	Внешняя		2,09	2,55	2,97	3,37	3,77
	Внутренняя	Водяное	2,05	2,72	3,4	4,08	4,8
		Воздухом	1,58	2,08	2,61	3,13	3,72
1,5	Внешняя		2,09	2,55	2,97	3,37	3,77
	Внутренняя	Водяное	2,39	3,17	3,97	4,76	5,6
		Воздухом	1,83	2,41	3,03	3,62	4,31
2,0	Внешняя		2,09	2,55	2,97	3,37	3,77
	Внутренняя	Водяное	2,67	3,54	4,43	5,31	6,25
		Воздухом	2,03	2,68	3,37	4,03	4,79
3	Внешняя		2,09	2,55	2,97	3,37	3,77
	Внутренняя	Водяное	3,08	4,14	5,18	6,21	7,31
		Воздухом	2,36	3,12	3,91	4,68	5,56
4	Внешняя		2,09	2,55	2,97	3,37	3,77
	Внутренняя	Водяное	3,48	4,62	5,79	6,94	8,16
		Воздухом	2,62	3,47	4,35	5,2	6,18
5	Внешняя		2,09	2,55	2,97	3,37	3,77
	Внутренняя	Водяное	3,8	5,04	6,31	7,56	8,89
		Воздухом	2,85	3,77	4,73	5,65	6,71
6	Внешняя		2,09	2,55	2,97	3,37	3,77
	Внутренняя	Водяное	4,07	5,41	6,78	8,12	9,54
		Воздухом	3,05	4,03	5,06	6,05	7,19

Приведенные значения в табл. 3.5 рассчитаны при расстоянии между стенками  $b=l=15, 20, 25, 30, 40$  мм соответственно ряду диаметров камер и при радиусе локальной площадки  $r=40, 45, 50, 60, 70$  мм аналогично. В случае же, когда принято отличные от рекомендованных в табл. 3.5 значения консоли нагрузки на фланце, толщины стенок могут выбираться по графикам на рис. 3.12 и 3.13.

**Проектирование размеров фланцев корпуса** камеры ведется



*Рис. 3.16. Относительная металлоемкость корпусов камер большой длины с водяным (1-4) и воздушным (5-8) охлаждением.*

- 1, 5 –  $D_0=600$  мм,  $K_{LR}=4$ ; 2, 6 –  $D_0=1400$  мм,  $K_{LR}=4$ ; 3, 7 –  $D_0=600$  мм,  $K_{LR}=6$ ; 4, 8 –  $D_0=1400$  мм,  $K_{IR}=6$

из условия их работы под действием сжимающих линейных нагрузок радиального направления, вызванных атмосферным давлением на внешнюю стенку корпуса (условно допускаем, что фланец в момент потери оболочки устойчивости является единственным элементом, который этому сопротивляется)

$$q_H = 0,1L_K / 2 = 0,05L_K, \text{ Н/мм} \quad (30)$$

Критическое значение линейной радиальной нагрузки из условия потери устойчивости пространственной формы [2, т. 3, с. 50]

$$q_{HKP} = 12 \times 10^3 B_X / \left( 4 + \frac{B_X}{C} \right) R_H^3, \quad (31)$$

где  $B_X$  – жесткость фланца при изгибе из плоскости кольца,  $B_X = Ebt^3/12$ ,

$C$  – жесткость кольца при кручении,

$$C = Gbt^3 \left( 1 - \frac{0,63}{\beta} + \frac{0,052}{\beta^5} \right) / 3,$$

$\beta = b/t$ ,  $G$  – модуль упругости второго рода, для сталей 08кп, 15  $G=73...78$  ГПа,

$R_H$  – радиус осевой линии кольца,  $R_H \approx 0,5(D_0 + b_C)$ .

Ширина фланца может назначаться конструктивно не меньше

$$b \geq b_C + 0,5(d_1 + d_0) + (5...12) \text{ мм} \quad (32)$$

Критическое значение линейной радиальной нагрузки из



условия потери устойчивости за счет плоского изгиба фланца в плоскости кривизны кольца [2, т. 3, с. 50]

$$q_{НКРП} = 4500B_Y / R_H^3, \quad (33)$$

где  $B_Y$  – жесткость при изгибе в плоскости кольца,  $B_Y = Etb^3/12$ , поскольку  $b \gg t$ , то этот фактор – нерешающий.

Исходя из уравнения

$$\left( 4 + \frac{1000Ebt^3}{4(Gbt^3(1 - 0,63(t/b) + 0,052(t/b)^5)) \cdot (0,5(D_0 + b_c))^3} \right) = 0,025D_0K_{LR}, \quad (34)$$

получены расчетные значения ширины фланца корпуса  $b$  и его толщины  $t$ , которые сведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

**Расчетные значения ширины и толщины фланца корпуса камеры, мм**

$K_{LR}=L_K/R$	Размеры фланца	Диаметр корпуса камеры, мм				
		600	800	1000	1200	1400
1	Ширина b	22,5	29	36,25	44	36,5
	Толщина t	7,89	10,64	13,31	15,91	18
2	Ширина b	22,75	29,25	36,75	44,5	57,25
	Толщина t	9,94	13,33	16,76	20,1	22,66
3	Ширина b	23	29,75	37,25	45	57,75
	Толщина t	11,33	15,34	19,17	22,94	25,93
4	Ширина b	23	30	37,5	45,25	58,25
	Толщина t	12,56	16,88	21,11	25,28	28,52
5	Ширина b	23,25	30,25	37,75	45,75	58,5
	Толщина t	13,51	18,18	22,74	27,19	30,74
6	Ширина b	23,5	30,25	38	46	59
	Толщина t	14,33	19,37	24,17	28,9	32,63

Проверку на возможность потери устойчивости за счет плоского изгиба фланца в плоскости кривизны кольца выполнять нет необходимости, поскольку очевидно при сопоставлении формулы (33) и левой части уравнения (34), что критические значения линейной радиальной нагрузки в этом случае будут большими (большие числовой коэффициент в числителе, третья степень ширины фланца сравнительно с его толщиной, меньший знаменатель).

**Торцевые части камер**, как это вытекает из приведенной выше классификации, могут быть эллиптическими, коническими, сферическими и плоскими с усилением или без него. **Эллиптические оболочки** стандартизированы по ГОСТ 6533-78, поэтому единственным определяемым размером есть толщина листа,

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
из которой они изготовлены. При этом следует иметь в виду, что высота стандартного эллиптического днища составляет 0,25 от номинального диаметра. Из условия сохранения устойчивости на основе исходного уравнения

$$d_k = \sqrt{0,1D_0^2/k_e E}, \quad (35)$$

где  $k_e$  – коэффициент пропорциональности для расчета эллиптических днищ, теоретическое значение для идеальных оболочек составляет (с учетом принятых единиц измерения)  $k_e=1210$ , тем не менее, по результатам экспериментальных исследований [4, с. 138] это значение должно быть уменьшено в 4...6 раз. Кроме того, неточности реальных оболочек требуют уменьшения показателя еще в 1,5...2 раза, что дает расчетное значение коэффициента пропорциональности порядка  $k_e=100$ . Полученные таким образом толщины эллиптических днищ из условия потери устойчивости приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

**Толщина стенки эллиптических торцевых частей из условия потери устойчивости, мм**

Номинальный диаметр торцевой части $D_0$									
600		800		1000		1200		1400	
Расчет	Минимум по ГОСТ	Расчет	Минимум по ГОСТ	Расчет	Минимум по ГОСТ	Расчет	Минимум по ГОСТ	Расчет	Минимум по ГОСТ
1,34	4	1,78	4	2,24	5	2,68	6	3,14	6

Из табл. 3.7 следует вывод, что при выборе толщины эллиптических торцевых частей из условия потери ими устойчивости следует ориентироваться на минимальные значения стандартных эллиптических днищ.

**Толщина сферических днищ** определяется из условия потери устойчивости по формуле:

$$d_k = \sqrt{0,1R_C^2/k_c E}, \quad (36)$$

где  $R_C$  – радиус сферы,  $R_C = (D_0^2 + 4H^2)/8H$ ,  $H$  – высота выпуклости сферы над фланцем,

$k$  – коэффициент пропорциональности, который принимается аналогично коэффициенту  $k_e$ .

Результаты расчетов толщин сферических днищ приведены в табл. 3.8.

**Торцевая часть конической формы** на потерю устойчивости рассматривается как конструкция, которая находится под одновременным действием сжимаемой силы осевого направления  $Q_{BK}$  и давления на боковые стенки  $p_K$ . Потеря устойчивости по аналогии с формулой (9) описывается уравнением

$$\frac{Q_{BK}}{Q_{KPBK}} + \frac{P_K}{P_{KPK}} = 1, \quad (37)$$

$Q_{KPBK}$  – критическое значение сжимающей силы осевого направления,

$P_{KPK}$  – критическое значение давления на боковую стенку конуса.

Таблица 3.8

**Толщина стенки сферических торцевых частей из условия потери устойчивости, мм**

H/D	Номинальный диаметр торцевой части $D_0$ и высота выпуклости сферы над фланцем $H$									
	$D_0=600$	$H$	$D_0=800$	$H$	$D_0=1000$	$H$	$D_0=1200$	$H$	$D_0=1400$	$H$
0,1	5,52	60	7,38	80	9,2	100	11,08	120	12,88	140
0,15	3,86	90	5,15	120	6,43	150	7,73	180	9	210
0,25	2,65	150	3,54	200	4,42	250	5,31	300	6,19	350

Сжимающая сила, действующая на коническую часть от круглого верхнего дна

$$Q_{BK} = 0,25 p_K \pi D_B^2, \quad (38)$$

где  $D_B$  – диаметр круга верхнего дна,  $D_B = D_0 - 2H \operatorname{tg} \alpha$ ,  $H$  – высота торцевой части,  $\alpha$  – угол между образующей и осью конуса, по условию возможности применения теоретических положений расчета конических конструкций этот угол должен быть не больше  $60^\circ$  [2, т.3, с. 169].

Критическое значение сжимающей силы осевого направления (числовой коэффициент учитывает отклонение оболочки от идеальной конической формы как следствие неточности изготовления) [2, т. 3, с. 169]

$$Q_{KPBK} = 90 \pi D_B E d_K^2 \cos \alpha / R_{KC}, \quad (39)$$

где  $R_{KC}$  – средний радиус кривизны оболочки в нижней основе конуса,  $R_{KC} = 0,5 D_0 / \cos \alpha$ .

Критическое значение давления на боковую стенку (с учетом принятых единиц измерения) [4, с. 122]

$$P_{KPK} = 1000 K_H \left( 3 - 2,3 \frac{D_B}{D_0} \right) \frac{E d_K^{2,5}}{L_K R_{KC}^{1,5}}, \quad (40)$$

где  $L_K$  – длина образующей боковой поверхности конуса,  $L_K = H / \cos \alpha$ ,

$K_H$  – коэффициент, учитывающий неточность формы конуса, данные в [2, с. 85] аппроксимируются формулой  $K_H = 0,57 - 6,6 \cdot 10^{-4} K_{Rcd} + 2,9 \cdot 10^{-7} K_{Rcd}^2$ , которая в пределах до  $K_{Rcd}=500$  может быть приведена к более простой зависимости вида

$K_H = 0,6 - 0,0007 K_{RCD}$ . Коэффициент  $K_{RCD} = R_{CK} / d_K$ , где  $R_{CK}$  – средний радиус кривизны конической части,  $R_{CK} = (D_0 + D_B) / 4 \cos \alpha$ .

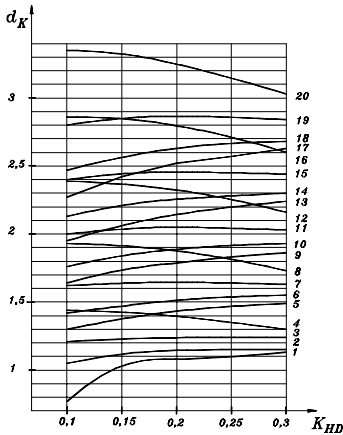
Учитывая, что давление на торцевую часть составляет  $p_K = 0,1$  МПа, окончательное уравнение для определения толщины стенки конуса имеет вид формулы (24), но с другими обозначениями

$$A = \frac{0,0785 D_0^2 (1 - 2K_{HD} \operatorname{tg} \alpha)^2}{565,2 (1 - 2K_{HD} \operatorname{tg} \alpha) E d_K^2 \cos^2 \alpha} = \frac{1,39 \cdot 10^{-4} D_0^2 (1 - 2K_{HD} \operatorname{tg} \alpha)}{E d_K^2 \cos^2 \alpha}, \quad (41)$$

$$B = \frac{3,54 \cdot 10^{-5}}{\left(0,6 - 0,0007 \frac{D_0 (1 - K_{HD} \operatorname{tg} \alpha)}{2 d_K \cos \alpha}\right) \cdot (3 - 2,3 (1 - 2K_{HD} \operatorname{tg} \alpha)) \cdot \frac{E}{K_{HD}} \left(\frac{d_K \cos \alpha}{D_0}\right)^{2,5}}, \quad (42)$$

где коэффициент относительной высоты торцевой части  $K_{HD} = H / D_0$ .

Результаты расчетов сведены в рис. 3.17, из которого видно, что характер изменения толщины оболочки при разных углах наклона образующей различен: при малых значениях углов толщина



*Рис. 3.17. Расчетные значения толщины стенки конической оболочки 1-4 -  $D_0=600$  мм; 5-8 -  $D_0=800$  мм; 9-12 -  $D_0=1000$  мм; 13-16 -  $D_0=1200$  мм; 17-20 -  $D_0=1400$  мм; 1, 5, 9, 13, 17 -  $\alpha=30^\circ$ ; 2, 6, 14, 18 -  $\alpha=40^\circ$ ; 3, 7, 15, 19 -  $\alpha=50^\circ$ ; 4, 8, 12, 16, 20 -  $\alpha=60^\circ$*

стенки с ростом коэффициента относительной высоты  $K_{HD}$  увеличивается, при больших углах – наоборот уменьшается.

При значении угла наклона образующей примерно  $\alpha=51,7^\circ$  толщина стенки конической оболочки остается неизменной при всех значениях коэффициента относительной высоты.

Относительная металлоемкость

$q_K = Q_{Di} / Q_{D;30;0,1}$ , которая является отношением массы оболочки данного диаметра  $Q_{D;30;0,1}$  с  $\alpha=30^\circ$  и  $K_{HD}=0,1$ , для всех диаметров камер изменяется одинаково, значение коэффициента относительной металлоемкости показаны на рис. 3.18. С увеличением высоты

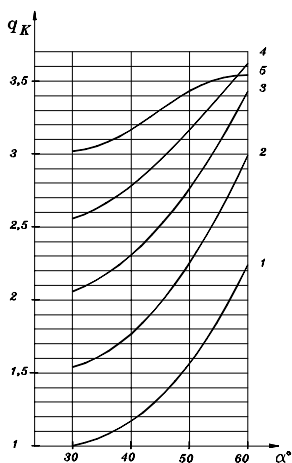


Рис. 3.18. Относительная металлоемкость конических оболочек  
 1 —  $K_{HD}=0,1$ ; 2 —  $K_{HD}=0,15$ ; 3 —  $K_{HD}=0,2$ ; 4 —  $K_{HD}=0,25$ ; 5 —  $K_{HD}=0,3$

оболочки диапазон изменения массы в зависимости от угла образующей уменьшается, что подтверждает тезис, сформулированный выше относительно влияния на толщину стенки угла наклона образующей. Тем не менее, металлоемкость следует рассматривать комплексно относительно всей торцевой части, поскольку с увеличением диаметра  $D_B$  возрастает толщина круглой плоской части. Эта толщина определяется по схеме для круглой пластинки при равномерной нагрузке по всей площади [2, с. 566]. При условии, что круглая пластинка шарнирно опирается на конусную часть (такое условие целиком приемлемое, если учесть податливость конической оболочки) максимальный прогиб в центре пластины, мм (при ограничении его не больше 1% от пролета пластины)

$$y_{MAX} = 0,000696 \frac{P_K R_{BK}^4}{Ed_{BK}^3} = 0,000435 \frac{P_K D_{BK}^4}{Ed_{BK}^3} \leq [y] = 0,01 D_{BK}, \quad (43)$$

где  $R_{BK}$ ,  $D_{BK}$  — соответственно радиус и диаметр круглой пластинки,

$d_{BK}$  — толщина верхней плоской детали конической торцевой части.

В этом случае максимальные напряжения в центре пластины

$$\sigma_{MAX} = 0,31 \frac{P_K D_{BK}^2}{d_{BK}^2} \leq \sigma_T, \quad (44)$$

где  $\sigma_T$  — предел текучести, для низкоуглеродистых сталей  $\sigma_T=220...250$  МПа.

Таким образом, толщина круглой пластины конической торцевой части из условия ограничения прогиба

$$d_{BK} = \sqrt[3]{\frac{0,00435 P_K D_{BK}^3}{E}} \quad (45)$$

Результаты расчета характеристик конической торцевой части с круглым диском приведены в табл. 3.9, а именно: расчетная толщина диска  $d_{BK}$  (мм), массы диска  $Q_{BK}$  и полная конической оболочки с

диском  $Q_f$ . (кг)

Таблица 3.9

**Некоторые характеристики конических торцевых частей с круглым дном**

$D_0$	$\alpha$	$K_{HD}=0,1$			$K_{HD}=0,15$			$K_{HD}=0,2$			$K_{HD}=0,25$			$K_{HD}=0,3$		
		$d_{BK}$	$Q_{BK}$	$Q_f$	$d_{BK}$	$Q_{BK}$	$Q_f$	$d_{BK}$	$Q_{BK}$	$Q_f$	$d_{BK}$	$Q_{BK}$	$Q_f$	$d_{BK}$	$Q_{BK}$	$Q_f$
600	30	6,9	12,03	12,9	6,5	9,8	11,3	6,0	7,9	9,9	5,6	6,3	8,7	5,1	4,9	7,7
	40	6,5	10,0	11,3	5,9	7,3	9,0	5,2	5,1	7,3	4,6	3,4	6,0	3,9	2,1	5,1
	50	6,0	7,7	9,2	5,0	4,6	6,7	4,1	2,5	5,1	3,2	1,2	4,1	2,2	0,4	3,7
	60	5,1	4,9	7,0	3,8	1,9	4,8	2,4	0,5	3,8	1,0	0,04	3,5	Полный конус		
800	30	9,8	28,5	30,8	8,6	23,3	26,8	8,0	18,8	23,4	7,5	14,8	20,6	6,8	11,5	18,3
	40	8,7	23,8	26,4	7,8	17,3	21,3	6,9	12,1	17,3	6,1	8,1	14,3	5,2	5,1	12,1
	50	7,8	18,2	21,7	6,7	10,1	15,9	5,5	5,9	12,1	4,2	2,7	9,8	2,3	0,96	8,6
	60	6,9	11,5	16,5	5,0	4,6	11,3	3,2	1,2	8,9	1,4	0,1	8,2	Полный конус		
1000	30	11,5	55,7	60,1	10,8	45,5	52,2	10,0	36,6	45,7	9,3	29	40,2	8,5	22,5	35,1
	40	10,8	46,4	51,6	9,8	33,8	41,5	8,7	22,6	33,8	7,6	15,8	27,9	6,5	9,9	23,7
	50	9,9	35,6	42,4	8,4	21,4	31,1	6,8	11,6	23,6	5,3	5,3	19,2	3,7	1,9	16,9
	60	8,5	22,5	32,3	6,3	9,0	22,0	4,0	2,4	17,4	1,8	0,2	16,0	Полный конус		
1200	30	13,9	96,3	104	12,9	78,6	90,2	12,0	63,3	78,9	11,1	50,1	69,4	10,2	38,9	61,6
	40	13,0	80,2	89,2	11,7	58,3	71,8	10,4	40,8	58,3	9,1	27,3	48,2	7,8	17,1	41,0
	50	11,9	61,5	73,2	10,1	36,9	53,7	8,2	20	40,8	6,3	9,2	33,1	4,5	3,2	29,2
	60	10,2	38,9	55,8	7,5	15,5	38,1	4,8	4,1	30,1	2,1	0,3	27,6	Полный конус		
1400	30	16,2	153	165	15,1	125	143	14,0	101	126	13	79,6	110	11,9	61,7	97,9
	40	15,2	127	142	13,7	92,6	114	12,1	64,8	92,6	10,6	43,3	76,6	9,1	27,1	65,1
	50	13,9	97,7	116	11,7	58,7	85,3	9,6	31,7	64,8	7,4	14,6	52,6	5,2	5,2	46,3
	60	11,9	61,8	88,6	8,8	24,6	60,4	5,63	6,5	47,7	2,5	0,6	43,9	Полный конус		

Из табл. 3.9 очевидно, что уменьшение диаметра круглого диска во всех случаях приводит к уменьшению массы как самого диска, так и конической торцевой части в целом. Этот же вывод демонстрируется данными (табл. 3.10) об относительной металлоемкости конической торцевой части с круглым диском  $q_f$ , которая определяется как отношение массы конкретной торцевой части данного диаметра к массе части того же диаметра при  $\alpha=30^\circ$  и  $K_{HD}=0,1$ , причем эти показатели от диаметра камеры не зависят.

Таблица 3.10

**Относительная металлоемкость  $q_f$  конических торцевых частей с круглым диском и доля массы диска в полной массе  $q_{BK}$**

$\alpha$	$K_{HD}=0,1$		$K_{HD}=0,15$		$K_{HD}=0,2$		$K_{HD}=0,25$		$K_{HD}=0,3$	
	$q_f$	$q_{BK}$	$q_f$	$q_{BK}$	$q_f$	$q_{BK}$	$q_f$	$q_{BK}$	$q_f$	$q_{BK}$
30	1	0,927	0,87	0,871	0,76	0,8	0,67	0,72	0,59	0,63
40	0,86	0,899	0,69	0,81	0,56	0,7	0,465	0,565	0,39	0,42
50	0,71	0,84	0,52	0,69	0,39	0,49	0,32	0,28	0,28	0,11
60	0,54	0,7	0,37	0,41	0,29	0,14	0,27	0,01	-	-

Согласно табл. 3.10 наиболее оптимальной конструкцией является конус с небольшим диском (например – диаметром,

достаточным только для подвески крышки) или без него. Кроме того, очевидно, что с увеличением угла наклона образующей к оси конуса относительная металлоемкость уменьшается. Для полного конуса (без диска) при угле наклона  $\alpha=51,7^\circ$  и  $K_{HD}=0,395$  относительная металлоемкость  $q_f$  составляет 0,258.

Во всех случаях максимальные напряжения составляют 182,2 Мпа, что объясняется единым для всех конструкций нормативом ограничения прогиба, причем эти напряжения составляют около 80% от границы текучести.

**Диск плоской торцевой части без усиления** (схема 44) рассчитывается аналогично диску конической части, тем не менее, поскольку он соединен сваркой непосредственно с фланцем, жесткость которого значительно превышает жесткость конуса, то расчетная схема может соответствовать круглой пластине, нагруженной равномерно по всей площади и заземленной по контуру. В этом случае (при том же допустимом прогибе) толщина диска [2, т. 1, с. 566]

$$d_{BK} = \sqrt[3]{\frac{0,00107 p_K D_{BK}^3}{E}}, \quad (46)$$

расчетные значения которой для разных номинальных диаметров камер приведены в табл.3.11.

Таблица 3.11

**Расчетная толщина дисков без подкрепления**

Номинальный диаметр $D_0$ , мм	600	800	1000	1200	1400
Толщина диска $d_{BK}$ , мм	4,9	6,6	8,2	9,8	11,4

Сопоставление конструктивных вариантов оболочек для изготовления крышек камер по критерию металлоемкости сведены в табл. 3.12, причем объектом для сравнение принято круглый диск соответствующего диаметра без подкрепления. Из данных табл. 3.12 следует, что наилучшие показатели по критерию металлоемкости имеют конические конструкции с углом наклона образующей к оси  $60^\circ$  при относительной высоте 0,25. Тем не менее, в этом случае, особенно для камер больших размеров, могут увеличиваться их габаритные размеры и объем, что усложнит конструкцию механизмов подъема крышки, увеличит время вакуумирования камер. Неплохие показатели имеют эллиптические днища нестандартной расчетной толщины, тем не менее, их изготовление проблематично именно по причине несоответствия стандартам.

**Соотношение масс оболочек для крышек разных конструкций**

Характеристика конструкции оболочки		Номинальный диаметр камеры, мм				
		600	800	1000	1200	1400
Сферическая оболочка при коэффициенте отношения высоты к номинальному диаметру $H/D$	0,1	0,45	0,451	0,45	0,452	0,45
	0,15	0,472	0,473	0,472	0,473	0,472
	0,25	0,54	0,541	0,541	0,541	0,541
Эллиптическое днище толщиной по (табл. 3) и минимальной по ГОСТ 6533-78	расчет	0,428	0,414	0,41	0,404	0,402
	минимум	1,276	0,93	0,916	0,905	0,769
Коническая оболочка с углом наклона образующей к оси $60^\circ$ и коэффициентом относительной высоты $H/D$	0,1	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
	0,15	0,437	0,437	0,437	0,437	0,437
	0,25	0,317	0,317	0,317	0,317	0,317
Коническая оболочка с углом наклона образующей к оси $50^\circ$ и коэффициентом относительной высоты $H/D$	0,1	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
	0,15	0,616	0,616	0,616	0,616	0,616
	0,25	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Коническая оболочка с углом наклона образующей к оси $40^\circ$ и коэффициентом относительной высоты $H/D$	0,1	1,033	1,024	1,023	1,024	1,075
	0,15	0,824	0,824	0,824	0,824	0,824
	0,25	0,554	0,553	0,553	0,554	0,554

Поэтому, учитывая эти замечания, наиболее целесообразной по критерию металлоемкости можно считать конструкцию с конической оболочкой при угле наклона образующей  $60^\circ$  и



Глава 3. Оборудование для реализации процесса  
 относительной высоте 0,15...0,2.

Простейшими с точки зрения технологии изготовления есть плоские круглые диски, тем не менее, их чрезмерная металлоемкость требует исследования возможности снижения этого показателя, например, за счет усиления (схема 43).

Для **плоских круглых днищ с усилением** технологически наиболее реальна конструкция с приваренными ребрами, образующими перекрестную структуру. Другие варианты (радиально-кольцевая, радиальная структуры) сложнее с точки зрения расположения ребер, их номенклатуры, дают неодинаковые размеры элементов структуры (ЭС) и могут применяться при формировании диска или даже всей крышки методом литья.

Толщина дна ЭС квадратной формы, рассматриваемая как прямоугольная пластинка, заземленная со всех сторон, определяется, [2, т. 1, с. 554, 557] с учетом принятых единиц измерения

$$d_{BK} = \sqrt[3]{\frac{1,38 \cdot 10^{-5} p_K l^3}{K_{yl} E}}, \quad (47)$$

где  $l$  - шаг ребер,

$K_{yl}$  - относительный прогиб дна ЭС,  $K_{yl} = y/l$ ,  $y$  - максимальный прогиб дна ЭС.

Максимальные напряжения изгиба в пластине дна ЭС в зоне возле ребра рассчитываются через линейный момент нагружения  $m_p = 0,513 p_K l^2$

$$\sigma = \frac{3,078 p_K l^2}{d_{BK}^2} = \frac{3,078 p_K l^2}{\left( \frac{1,38 \cdot 10^{-5} p_K l^3}{K_{yl} E} \right)^{2/3}} \leq \sigma_T \quad (48)$$

Если ограничить напряжения изгиба значением, которое не превышает 80% границы текучести, то относительный прогиб дна ЭС будет составлять  $K_{yl} = 0,0001$ , что и принято в дальнейшем для расчета его толщины на основе формулы (47). Значение толщин в зависимости от шага ребер приведены в табл. 3.13.

Таблица 3.13

**Расчетные значения толщины дна элемента структуры перекрестного усиления, мм**

Шаг ребер	50	75	100	125	150	175	200
Толщина дна	2,07	3,1	4,13	5,16	6,2	7,23	8,3

Прогиб всего диска, усиленного ребрами согласно [2, т.2, с. 148, 151; 5, с. 405-420]

$$y_K = p_K R_{BK}^4 / 64 C_V = p_K D_0^4 / 1,024 \cdot 10^6 C_V, \quad (49)$$

где  $C_V$  – приведенная жесткость дна,

$$C_V = \frac{1}{8}(3C_X + 2C_C + 3C_Y) = \frac{E}{8} \left( \frac{6J}{l_p} + \frac{8d_{BK}^3}{12(1-\mu^2)} \right), \quad (50)$$

$J$  – момент инерции сечения ребра относительно оси, которая проходит через центр его веса,

$C_X, C_Y$  – жесткости на изгиб по главным направлениям,

$$C_X = C_Y = \frac{Ed_{BK}^3}{12(1-\mu^2)} + \frac{EJ}{l_p},$$

$C_C$  – составляющая жесткости, которая учитывает жесткость на кручение,  $C_C = \frac{Ed_{BK}^3}{12(1-\mu^2)}$ ,

$\mu$  – коэффициент Пуассона, принято  $\mu=0,3$ .

Момент инерции сечения ребра  $J = b_p h_p^3 / 12$ , где  $b$  и  $h$  – ширина и высота ребра. Обозначив  $K_{hd} = h/d_{BK}$ , и  $K_{bd} = b/d_{BK}$  получим окончательное выражение для приведенной жесткости дна

$$C_V = \frac{E}{8} \cdot \left( \frac{K_{bd} K_{hd}^3 d_{BK}^4}{2l_p} + 0,733 d_{BK}^3 \right) \quad (51)$$

Значения коэффициента высоты ребра  $K_{hd}$  рассчитаны из условия ограничения прогиба диска не больше 0,01 от диаметра на основе начального уравнения

$$\frac{p_K D_0^4}{1,024 \cdot 10^6 \frac{E}{8} \cdot \left( \frac{K_{bd} K_{hd}^3 d_{BK}^4}{2l_p} + 0,733 d_{BK}^3 \right)} - 0,01 D_0 = 0 \quad (52)$$

Сопоставление металлоемкости конструкций с усилением диска проведено, исходя из конструктивной схемы ребрения, в которой наибольшее ребро совпадает с диаметром (эта схема в наибольшей мере использует потенциальные возможности усиления и сокращает номенклатуру размеров ребер). Тогда количество ребер одного направления на одной половине диска  $z_p = \text{trunc}(2D_0/l_p)$ , а их общая длина

$$L_p = 2 \cdot \left[ D_0 + 2 \sum_1^{i=z_p} D_0 \sin \left( \arccos \frac{2il_p}{D_0} \right) \right] \quad (53)$$

Общая масса диска с усилением ребрами

$$Q_{PK} = 7,86 \cdot 10^{-6} (\pi D_0^2 d_{BK} / 4 + L_p K_{bd} K_{hd} d_{BK}) \quad (54)$$

Результаты расчета характеристик дисков с усилением ребрами (коэффициента высоты ребра  $K_{hd}$ , массы диска с ребрами  $Q_{PK}$  в кг, отношение массы диска с ребрами к массе диска без усиления того

же диаметра  $q_{PK}$ ) приведенные в табл. 3.14. Анализ данных из этой таблицы приводит к выводу, что практически для всех диаметров крышек усиление дисков ребрами дает эффект по критерию металлоемкости только при малом значении шага ребер, поскольку только в этом случае толщина дна может существенно отличаться от толщины дисков без усиления. Такие конструкции можно рекомендовать при изготовлении оребренных дисков методом литья, так как именно такой вариант в комплексе с учетом трудозатрат может обеспечить получение выигрыша. Тем не менее, реально ни в одном из вариантов конструкция дисков с усилением ребрами не может конкурировать по металлоемкости с крышками других конструктивных вариантов (кроме стандартных эллиптических днищ). Этот вывод вытекает из сопоставления данных табл. 3.12 и 3.14. Увеличение коэффициента относительной ширины ребра  $K_{bd}$  ухудшает показатели металлоемкости конструкции.

Следует обратить внимание еще на одну особенность конструкции камеры, которая дает дополнительный аргумент в пользу конических, эллиптических и сферических днищ. Для вариантов схем 71 и 73 с верхней подвеской целесообразно узел подвески и центрального подвода тока смонтировать в своде днищ. При этом увеличится ход механизма подъема крышки, но этот недостаток можно нейтрализовать ее шарнирной подвеской, которая разрешает за счет перекоса при закрытии перевести крышку над подвеской. Такой метод более удобен по металлоемкости, поскольку увеличение общей высоты камеры для размещения подвески за счет выпуклой крышки более экономично, чем за счет корпуса - в последнем варианте увеличивается высота двух стенок.

**Фланец крышки** находится под влиянием двух дестабилизирующих факторов: равномерно распределенная нагрузка радиального направления, которая может вызвать потерю устойчивости плоской или пространственной формы; равномерно распределенный момент нагружения  $m_K$ , вызывающий напряжения изгиба в радиальном и тангенциальном направлениях.

Уравнение совокупного действия этих факторов

$$\frac{\sigma_V}{0,8\sigma_T} + \frac{q_B}{q_{BKP}} = 1, \quad (55)$$

где  $\sigma_V$  – эквивалентные напряжения изгиба в радиальном и тангенциальном направлениях, действующие в двух взаимно перпендикулярных направлениях, согласно [2, т. 1, с. 568] (с учетом принятых единиц)

## Характеристики круглых дисков крышек, усиленных ребрами

$D_0$	$l$	$d_{BK}$	$K_{hd}$	$K_{hd}$	$Q_{PK}$	$q_{PK}$	$K_{hd}$	$K_{hd}$	$Q_{PK}$	$q_{PK}$
600	50	2,5	1,0	5,76	8,67	0,796	2,0	4,57	10,5	0,96
	75	3,5		3,8	10,4	0,955		3,02	11,94	1,1
	100	4,5		2,11	11,76	1,08		1,77	12,8	1,18
800	50	2,5	1,0	7,9	17,55	0,68	2,0	6,27	22,06	0,85
	75	3,5		5,97	21,1	0,82		4,4	25,38	0,98
	100	4,5		4,06	23,97	0,99		3,22	27,6	1,07
	125	5,5		2,82	27,25	1,06		2,24	30,5	1,18
	150	6,5		0,76	27,39	1,06		0,62	28,4	1,1
1000	50	2,5	1,0	9,97	30,63	0,61	2,0	7,92	39,56	0,78
	75	3,5		7,16	36,03	0,71		5,68	44,5	0,88
	100	4,5		5,45	40,9	0,81		4,33	48,67	0,97
	125	5,5		4,23	45,9	0,912		3,36	55,06	1,05
	150	6,5		3,21	51,6	1,02		2,55	58,33	1,16
	175	7,5		2,13	54,44	1,08		1,7	59,23	1,18
1200	50	2,5	1,0	12,01	48,67	0,56	2,0	9,54	64,21	0,74
	75	3,5		8,69	55,93	0,64		6,9	70,51	0,81
	100	4,5		6,72	63,56	0,73		5,33	77,41	0,89
	125	5,5		5,37	71,67	0,82		4,26	85,06	0,98
	150	6,5		4,34	78,49	0,9		3,45	90,67	1,04
	175	7,5		3,48	86,44	0,998		2,76	98,87	1,14
	200	8,5		2,64	91,24	1,05		2,09	100,5	1,15
1400	50	2,5	1,0	14,05	72,41	0,52	2,0	11,15	97,19	0,7
	75	3,5		10,2	82,89	0,6		8,1	108,7	0,77
	100	4,5		7,94	92,55	0,67		6,3	114	0,83
	125	5,5		6,43	104,3	0,75		5,1	126,5	0,91
	150	6,5		5,3	114,8	0,83		4,22	136	0,98
	175	7,5		4,43	123,5	0,89		3,5	142,8	1,03
	200	8,5		3,67	135,4	0,98		2,91	154,5	1,12

$$\sigma_v = \frac{12,53m_K}{(1,3 + 280/D_0^2)t_K^2}; \quad (56)$$

$q_{BKP}$  - критическое значение линейной радиальной нагрузки из условия потери устойчивости пространственной формы, определяется аналогично формулам (31) и (34) с изменением соответствующих обозначений  $t$  на  $t_K$ ,  $b$  на  $b_K$ ;

$q$  - радиальная линейная нагрузка от давления на крышку,  $q_B = 0,1K_{ND}D_0$ .

На основе данных оптимальных параметров, которые приведены в табл. 3.12, коэффициент относительной высоты оболочек крышек можно выбирать для сферических оболочек  $K_{HD}=0,1$ , для конических -  $K_{HD}=0,2$ , эллиптических -  $K_{HD}=0,25$ . Плоские крышки отвечают значениям относительной высоты  $K_{HD}=0,02...0,04$ .

В формуле (55) в качестве предельного значения напряжений

изгиба принята величина, равная 80% от границы текучести, как это принималось во всех предыдущих аналогичных случаях. Равномерно распределенная моментная нагрузка, вызванная приложением линейной нагрузки от давления на крышку на некотором расстоянии  $l$  от кромки оболочки (выше установлено, что оптимальной консолью есть  $l=b$ )

$$m_k = q_k l_k = 0,025(D_0 + 2b_c)b_c \quad (57)$$

Из исходного уравнения, полученного после соответствующей подстановки в формулу (55), рассчитаны значения толщины фланцев (ширина фланцев из конструктивных соображений принята равной ширине фланцев корпуса камеры), которые приводятся в табл.3.15. Расчет указывает на то, что критерий потери устойчивости практически значения не имеет, поскольку высота крышки незначительна, радиальные сжимающие напряжения небольшие и при всех вариантах они нейтрализуются жесткостью оболочки или диска.

Таблица 3.15

**Расчетные значения размеров фланцев крышки, мм**

$D_0$	600	800	1000	1200	1400
$b$	24	30	38	46	59
$h$	6,42	6,53	8,22	9,9	12,2

К этому следует прибавить, что указанные в табл. 3.15 размеры толщины фланца имеют только ориентировочное значение, поскольку, как правило, именно в этот фланец встраивается шнур из вакуумной резины, герметизирующий стык крышки с корпусом. Другой вариант, когда шнур находится во фланце корпуса, менее целесообразен, так как при загрузке камеры он может повреждаться. Диаметр шнура выбирается, учитывая точность обработки стыковых поверхностей фланцев, их деформации как следствия сваривания и находится в пределах 10...18 мм с выступом над поверхностью базового фланца соответственно 2...6 мм. Поэтому фланец должен иметь толщину, которая позволяла бы разместить клиновидный паз для шнура с расширением в тело фланца. Угол наклона боковых стенок паза к стыковой поверхности фланца в пределах 15...30°.

**Подвеска** конструктивно состоит из траверсы и устройства подвода тока. Траверса как правило имеет схему балки, составленной с двух стенок, симметрично расположенных относительно оси камеры. Поскольку траверса электрически нейтральна, то она устанавливается на изоляторах с обеих сторон. Таким же образом от траверсы изолируется центральный шток устройства подвода тока. Изоляторы могут быть керамическими или

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
из полимерных материалов, чаще всего из фторопласта-4. Керамические изоляторы допускают большую нагрузку, более термостойки, но чрезвычайно сложны в обработке, особенно по поверхностям, где требуется высокая точность, чтобы не допустить локального перехода тлеющего разряда в дуговой. Кроме того, они чувствительны к неточному прилеганию опорных поверхностей, в этом случае возможно их хрупкое разрушение. Полимерные материалы хотя и имеют меньшую способность к нагрузке и термостойкость, однако не только легко обрабатываются, но благодаря пластическим деформациям могут более равномерно передавать нагрузки на опорные поверхности.

Высота стенки траверсы при выбранной ширине  $b$  (реально в пределах 8...16 мм соответственно для диаметров камер 600...1400 мм)

$$h_T = \sqrt{7,36Q_{MC}D_0/b_T[\sigma_F]}, \quad (58)$$

где  $Q_{MC}$  – масса садки и конструкции крепления в килограммах,

$[\sigma_F]$  – допустимые напряжения изгиба с учетом рабочей температуры не больше 600°, поскольку при температуре 600° граница прочности уменьшается в 2...3 раза (соответственно для низко- и среднеуглеродистых сталей), то рекомендуется значение допустимых напряжений, проверенных практикой,  $[\sigma_F]=70...75$  МПа.

Площадь опоры траверсы в изоляторе, определяется из предпосылки, что траверса гарантировано опирается на три точки, хотя таких точек при двустеночной конструкции четыре

$$A_{OT} = 3,26Q_{MC}/[\sigma_C], \quad (59)$$

где  $[\sigma_C]$  – допустимые напряжения на сжатие материала изолятора, для фторопласта-4 в зависимости от условий охлаждения опоры (имеется в виду, что кронштейн для изолятора крепится к стенке, которая охлаждается)  $[\sigma_C] = 7...10$  МПа, для керамических изоляторов  $[\sigma_C]=95...130$  МПа.

Опорная площадь изолятора центрального штока подвода тока определяется по формуле (59), но числовой коэффициент равняется 9,81, а допустимые напряжения на сжатие для фторопласта-4  $[\sigma_C]=4...6$  МПа. В обоих случаях фторопластовый изолятор необходимо по возможности извне подкрепить металлической оболочкой.

Глава 3. Оборудование для реализации процесса  
3.3.2. Система подготовки газовой среды

Внедрение технологии ВДГРТ модификации металлической поверхности предусматривает в качестве одного из факторов влияния возможность оперативного изменения состава рабочей газовой среды (РГС) как в аспекте количества компонентов, так и их соотношения. Эта предпосылка может быть выполнена только в случае использования автоматизированных систем подготовки РГС. В принципиальном плане подобные системы могут работать, используя методы весового или объемного дозирования.

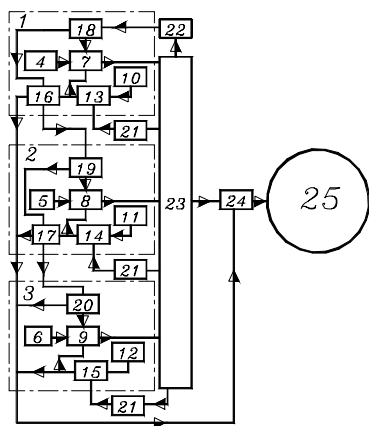


Рис.3.19. Принципиальная схема автоматической системы подготовки рабочих газовых сред

Сопоставление этих методов с точки зрения влияния на точность процесса подготовки РГС реальных производственных условий отдает предпочтение объемному дозированию, которое использует принцип контроля давления в резервуаре РГС. В случае же использования метода весового дозирования необходимо было бы с очень высокой точностью определять вес резервуара РГС, связанного при этом с оборудованием магистральями, упругие характеристики которых существенно превышают вес газов.

Обзор возможных реально применяемых типов систем подготовки РГС приведен в разделе 3.2. Ниже приведены сведения о системе, работающей по методу объемного дозирования [6], ее принципиальная схема в варианте трехкомпонентной РГС показана на рис. 3.19.

Система состоит из магистралей компонентов первого (с наименьшим содержанием в РГС) 1, второго (следующего большего по объемному процентному содержанию) 2, последнего (с наибольшим содержанием в РГС) 3, в каждой из которых есть резервуары газообразных компонентов 4, 5, 6, клапаны пуска компонентов в РГС 7, 8, 9, задатчики давления компонентов в РГС 10, 11, 12, блоки сравнения 13, 14, 15, переключатели (за исключением магистрали последнего компонента) 16, 17, включатели 18, 19, 20; датчик давления РГС 21, датчик

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
минимального давления РГС 22, резервуар РГС 23, блок пуска РГС 24 в разрядную камеру 25. В случае, когда максимальное количество компонентов РГС больше трех, принципиальная схема должна включать дополнительно несколько магистралей типа 2, причем назначение магистралей подчиняется правилу постепенного увеличения содержания компонента в РГС.

После включения системы в связи с тем, что в резервуаре 23 давление меньше минимально допустимого, сигнал от датчика 22 подается на включатель первой магистрали 18. Если магистраль компонента включена, т.е. этот компонент по технологическому режиму входит в состав РГС, то включается клапан пуска данного компонента в РГС 7, после завершения запуска компонента в резервуар 23 давление в нем, контролируемое датчиком 21, увеличивается вплоть до значения, установленного задатчиком 10, блок сравнения выдает сигнал на отключение клапана 7 и в зависимости от положения переключателя 16 или включает магистраль следующего компонента или, если этот компонент в РГС последний (имеет наибольшее содержание), включает блок пуска РГС в камеру 25. Аналогично работают все следующие магистрали компонентов, исключая последнюю, блок сравнения которой может включать только блок пуска РГС в камеру. По мере расходования РГС давление в ее резервуаре уменьшится до минимально допустимого значения, срабатывает датчик минимального давления 22, процесс подготовки РГС возобновляется. В случае необходимости изменения состава среды включателями 18, 19, 20 и переключателями 16, 17 включаются необходимые и исключаются ненужные по технологическому режиму компоненты, а задатчиками 10, 11, 12 устанавливается содержание каждого из них в РГС. Эти действия можно выполнять и в ходе технологического процесса, причем инерционность системы по составу РГС определяется емкостью резервуара для РГС и уставкой задатчика компонента максимального содержания, которые в совокупности регламентируют общий объем РГС, используемый за один цикл работы системы.

Для изложения некоторых положений, описывающих работу системы, введем следующие обозначения:

$N$ - количество компонентов РГС,

$V_1, V_2... V_N$ —объемы резервуаров компонентов в м<sup>3</sup>,

$V$ - объем резервуара РГС в м<sup>3</sup>,

$p_1, p_2...p_N$ —абсолютное давление в резервуарах компонентов в МПа,

$p_0$  -абсолютное значение минимального давления в резервуаре РГС в МПа,



$p_{01}, p_{02} \dots p_{0N}$  – прирост давления в резервуаре РГС после запуска соответствующего компонента в МПа,

$K_1, K_2 \dots K_N$  – коэффициенты содержания компонентов в РГС (определяются путем деления процентного содержания компонента по объему на 100%).

$Q_1, Q_2 \dots Q_N$  – объемы газа компонентов в м<sup>3</sup> в состоянии атмосферного давления (состояние нормального газа – НГ).

$Q_0$  – объем начального количества РГС в м<sup>3</sup> в состоянии НГ, которая соответствует минимально допустимому давлению в резервуаре РГС,

$Q$  – максимальный объем готовой РГС в м<sup>3</sup> в состоянии НГ, который соответствует ее начальному количеству перед началом запуска в разрядную камеру, когда давление в резервуаре РГС равно максимальному абсолютному значению  $p$  (МПа).

$K_0$  – коэффициент содержания остаточного количества РГС,

Тогда коэффициенты содержания компонентов определяются

$$K_1 = \frac{Q_1}{Q - Q_0}; K_2 = \frac{Q_2}{Q - Q_0} \dots K_N = \frac{Q_N}{Q - Q_0}; K_0 = \frac{Q_0}{Q} \quad (1)$$

Если учесть, что

$$Q = 10Vp; (Q - Q_0) = Q(1 - K_0); p_0 = \frac{0,1Q_0}{V}, \quad (2)$$

то

$$Q_1 = K_1Q(1 - K_0); Q_2 = K_2Q(1 - K_0) \dots Q_N = K_NQ(1 - K_0), \quad (3)$$

а прирост давления в резервуаре РГС после запуска соответствующего компонента в МПа

$$p_{01} = \frac{0,1Q_1}{V} = \frac{0,1K_1Q(1 - K_0)}{V}; p_{02} = \frac{0,1Q_2}{V} = \frac{0,1K_2Q(1 - K_0)}{V} \dots \quad (4)$$

$$p_{0N} = \frac{0,1Q_N}{V} = \frac{0,1K_NQ(1 - K_0)}{V}$$

Но максимальное давление в резервуаре РГС

$$p = \frac{Q}{10V} = \frac{0,1Q}{V}, \quad (5)$$

поэтому

$$p_{01} = K_1p(1 - K_0); p_{02} = K_2p(1 - K_0) \dots p_{0N} = K_Np(1 - K_0) \quad (6)$$

Задатчики давления 10, 11, 12 (и им подобные в случае, если система рассчитана на количество компонентов больше трех) регулируются соответственно на значение, определяемое как манометрическое, измеренное в единицах избыточного давления

$$p_{Mi} = p_0 + \sum_1^i p_{0i} - 0,1 \quad (7)$$

Процесс запуска компонента в резервуар РГС из резервуара компонента описывается уравнением

$$dQ = q_v dt, \quad (8)$$

где  $dQ$  - элементарный объем компонента, который пропущен за элементарное время  $dt$ ,

$q$  - усредненный объемный расход компонента

$$q_v = q + 0,5dq, \quad (9)$$

где  $q$  - начальное значение объемного расхода,

$dq$  - изменение объемного расхода за время пропуска компонента.

Начальное значение объемного расхода и его изменение могут определяться по зависимости, известной из курса газовой динамики [7], если ввести обозначение:

$p_K$  - значение давления в резервуаре компонента,

$p_C$  - значение давления в резервуаре РГС.

$$q = mCA\sqrt{TR} \left( \frac{p_K}{p_C} \right)^{\frac{1}{k}} f \left( \frac{p_C}{p_K} \right) \quad (10)$$

$$dq = mCA\sqrt{TR} \left[ \left( \frac{p_K}{p_C} \right)^{\frac{1}{k}} f \left( \frac{p_C}{p_K} \right) - \left( \frac{p_K - dp_K}{p_C + dp_C} \right)^{\frac{1}{k}} f \left( \frac{p_C}{p_K + dp_C} \right) \right] \quad (11)$$

В формулах (10) и (11) применены обозначения:

$m$  - коэффициент расхода (справочное значение в зависимости от газа),

$A$  - площадь проходного сечения отверстия, через которое запускается компонент,

$T$  - абсолютная температура газа,

$R$  - газовая постоянная,

$$C = \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \quad (12)$$

где  $k$  - показатель адиабаты,

$f \left( \frac{p_{i+1}}{p_i} \right)$  - функция зависимости от соотношения давлений в

резервуарах РГС и компонента, которая определяется

$$f \left( \frac{p_{i+1}}{p_i} \right) = 1 - \left( \frac{p_{i+1} - a}{p_i} \right)^Y, \quad (13)$$

где  $a$  - сверхкритическое значение соотношения,  $a=0,528$ , при

$\frac{p_{i+1}}{p_i} \leq a = 0,528$  функция зависимости равняется единице; показатель

степени  $Y=0,9...1,5$  [6].

Приросты давления  $dp_K$  и  $dp_C$  определяются

$$dp_k = \frac{0,1 dQ}{V_k}; \quad dp_c = \frac{0,1 dQ}{V}, \quad (14)$$

$V_k$  – объем резервуара компонента.

Время подготовки РГС

$$t = \sum_1^N \frac{Q_i}{q_i} \quad (15)$$

При времени использования РГС в период одного цикла работы системы

$$t_p = \frac{Q}{q_p}, \quad (16)$$

где  $q$  – расход РГС в разрядной камере, коэффициент неравномерности подачи РГС по времени

$$K_{НГ} = \frac{t_p - t}{t_p} \quad (17)$$

Приведенные зависимости позволяют определять основные параметры автоматизированных систем подготовки РГС в процессе их проектирования.

### 3.3.3. Система очистки поверхности катодным распылением

Очистка металлических поверхностей методом катодного распыления (ОМКР) в режиме тлеющего разряда применяется в исследовательской практике и в промышленности в качестве

основной или вспомогательной технологических операций. Структурная схема упрощенной системы ОМКР приведена на рис. 3.20.

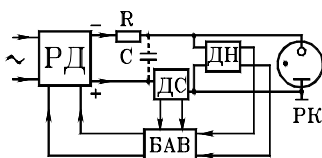


Рис. 3.20. Структурная схема системы ОМКР

Центральным элементом системы является газоразрядная камера РК, металлический корпус которой одновременно служит анодом, а деталь, подлежащая очистке, выполняет функцию катода.

Камера заполнена инертным газом или газовыми смесями при давлении порядка  $10^{-2}$  мм. рт. ст. Питание камеры осуществляется от регулируемого вторичного источника питания РД через балластный реостат R и датчик тока ДС. Напряжение на выходе источника может регулироваться вручную или автоматически до значений порядка 1000...1500 В (как правило, используется электронное тиристорное регулирование). Блок автоматического выключения БАВ служит для кратковременного

выключения источника питания в случаях выхода параметров режима камеры за допустимые границы. Решение об автоматическом выключении принимается в БАВ на основе информации, поступающей от датчика тока ДС и датчика напряжения ДН. Резистор R, ограничивающий значение тока камеры, в явном виде может отсутствовать, тогда его роль выполняет сопротивление выхода источника питания, сопротивление датчика тока и т.п..

Известно [8], что распыление вещества катода существенно возрастает в режиме аномального тлеющего разряда при низком давлении газа, чему соответствует значительное (больше 1 кВ) напряжение на электродах разрядной камеры и относительно малый (не больше долей ампера) ток электрического разряда в газе. Следует учесть, что при выходе на режим аномального разряда увеличение напряжения источника сопровождается возникновением локальных дуговых разрядов (микродуг). Их причиной могут быть загрязнение и окисные пленки на поверхности реальных деталей. Микродуги вызывают “сгорание” поверхностных неоднородностей и, таким образом, вносят существенный полезный вклад в общий процесс очистки. Итак, особенность систем очистки поверхности реальных деталей заключается в объединении двух рабочих процессов: тлеющего и локального дугового разрядов. Для недопущения перехода микродуг в общий дуговой разряд, который уже будет относиться к аварийному режиму, блок БАВ обеспечивает кратковременное гашение разряда после возникновения каждой микродуго.

Рассматриваемая система очистки имеет следующие существенные недостатки:

1) большой излишек мощности источника питания, который определяется напряжением аномального тлеющего разряда (более чем 1 кВ) и током микродуг (десятки - сотни ампер), по отношению к средней мощности, потребляемой камерой;

2) поскольку балластный резистор должен пропускать как малые токи тлеющего разряда, так и большие токи микродуг, невозможно выбрать сопротивление R из условия устойчивой работы системы; при этом, с целью предотвращения аварийного режима общей дуги, принципиально необходим высоконадежный блок БАВ;

Указанные обстоятельства резко ухудшают экономичность, надежность, массогабаритные показатели оборудования, а также создаются недопустимо большие импульсные нагрузки в сети питания. Кардинально улучшить характеристики системы ОМКР возможно за счет введения промежуточного накопителя энергии между источником РД и разрядной камерой РК. Роль такого

накопителя с успехом может выполнять конденсатор достаточно большой емкости  $C$  (на рис. 3.20 его включение показано штриховыми линиями). В процессе зарядки через резистор  $R$  в конденсаторе создается запас энергии, который тратится при протекании импульсного разрядного тока микродуг; этот процесс - циклический. Отличительные особенности системы ОМКР с емкостным накопителем состоят в следующем:

1) поскольку в режиме микродуги ток камеры замыкается в основном через емкостную ветку, появляется возможность выбора сопротивления  $R$  из условия предупреждения общего дугового разряда: устойчивая работа системы по этой причине обеспечивается даже при отсутствии блока БАВ;

2) источник питания РД в данном случае не предназначен для непосредственного создания больших импульсных токов микродуг, поэтому необходимая мощность источника резко уменьшается.

Таким образом, подключением емкостного накопителя возможно существенно улучшить основные характеристики системы ОМКР и, в том числе, избавиться от неблагоприятного влияния системы на сеть питания.

С целью дальнейшего усовершенствования системы ОМКР необходимо исследовать энергетические процессы в зарядно-разрядных цепях конденсатора  $C$ . Для этого выполнен поиск оптимального процесса накопления энергии в конденсаторе по критерию максимума коэффициента полезного действия.

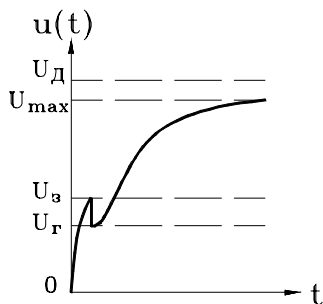


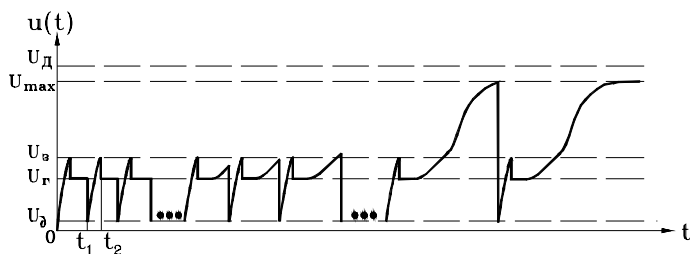
Рис. 3.21. Характер изменения напряжения на электродах разрядной камеры для предварительно очищенной детали

Пусть напряжение источника  $U_d$  неизменно и выбрано из условия эффективной очистки в режиме тлеющего разряда. Примерная качественная картина изменения напряжения в камере  $u(t)$  во времени с момента включения показана на рис. 3.21 (случай предварительно очищенной поверхности детали) и на рис. 3.22 (неочищенная поверхность). Для удобства здесь и в дальнейшем будем игнорировать знаки напряжения, т.е. рассматривать его модуль. В соответствии с рис. 3.20 напряжение на камере  $u(t)$  после

достижения значения потенциала зажигания  $U_з$  прыжком уменьшается к потенциалу горения  $U_r$ , а затем плавно достигает

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
заданного максимального значения  $U_{max}$  в области аномального тлеющего разряда.

Отметим, что в связи с малым значением тока потребления при низких давлениях газовой атмосферы в разрядной камере, напряжение  $U_{max}$  близко к напряжению источника  $U_{д}$ . Отличие поведения системы в случае неочищенной детали проявляется главным образом после зажигания тлеющего разряда. Он с большой вероятностью в скором времени переходит в локальный дуговой разряд, который сопровождается (рис. 3.22) скачкообразным уменьшением напряжения  $u(t)$  к значению потенциала горения дуги  $U_0$  (порядка десятков вольт). Поскольку запас энергии конденсатора ограничен, то продолжительность микродуги не превышает долей секунды, после чего разряд в камере прекращается, снова начинается



*Рис. 3.22 Схема развития процесса очистки металлической поверхности*

зарядка конденсатора и т.д. Другими словами, система работает в автоколебательном режиме со случайным квазипериодом, который, по мере очистки поверхности, в среднем увеличивается за счет роста интервалов времени, на протяжении которых камера находится в состоянии сначала нормального, а потом и аномального тлеющего разрядов. На рис. 3.22 эти процессы иллюстрируются отдельными фрагментами, последний из которых соответствует прекращению микродуг и окончательному выходу системы на режим максимального напряжения. Процесс зарядки конденсатора  $C$  после каждой микродуги в некотором отношении непроизводительный, поскольку в это время очистка детали не происходит. С другой стороны, во время зарядки конденсатора резистор  $R$  поглощает значительную часть энергии источника питания. Для характеристики экономичности процесса зарядки определим коэффициент полезного действия системы зарядки как отношение прироста энергии  $\Delta \mathcal{E}_C$

Глава 3. Оборудование для реализации процесса конденсатора за время зарядки к энергии  $E$ , которую тратит источник за это же время

$$\eta = \frac{\Delta E_C}{E} \quad (1)$$

Найдем величины, которые входят в выражение (1), пропустив некоторые промежуточные преобразования

$$\Delta E_C = \frac{1}{2} C (U_3^2 - U_\partial^2); \quad (2)$$

$$E = \int_{t_1}^{t_2} U_D \cdot i(t) \cdot dt = C U_D (U_D - U_\partial) (1 - e^{-\frac{T}{RC}}), \quad (3)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – время начала и конца произвольного интервала зарядки конденсатора,  $T = t_2 - t_1$ .

Для упрощения дальнейших расчетов удобно принять  $t_1 = 0$ , таким образом, продолжительность каждого из циклов зарядки конденсатора  $T = t_2$ . Для выражения величины  $T$  через основные параметры системы воспользуемся формулой напряжения заряженного конденсатора

$$u_C(t) = (U_D - U_\partial) (1 - e^{-t/RC}) \quad (4)$$

При  $t = T$  получим уравнение

$$U_3 = (U_D - U_\partial) (1 - e^{-T/RC}), \quad (5)$$

решением которого будет

$$T = -RC \cdot \ln \left( 1 - \frac{U_3}{U_D - U_\partial} \right) \quad (6)$$

С учетом формулы (6) выражение (1) для коэффициента полезного действия можно привести к виду

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{U_3}{U_D} - \frac{U_\partial^2}{U_D U_3} \right) \quad (7)$$

В связи с тем, что в работоспособной системе выполняется соотношение  $U_D > U_3 \gg U_\partial$ , вместо выражений (6) и (7) практически всегда можно пользоваться приближенными формулами

$$T \approx -RC \cdot \ln \left( 1 - \frac{U_3}{U_D} \right) \quad (8)$$

$$\text{и } \eta \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{U_3}{U_D} \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что наибольший коэффициент полезного действия, равный 0,5, достигается в предельном случае

$U_{Д} = U_{3}$ . При этом время зарядки согласно (8) неограниченно растёт. В реальных же системах, где напряжение питания может превышать напряжение зажигания в два и больше раз, коэффициент полезного действия не превышает 0,25.

Полученные результаты свидетельствуют о низкой экономичности данного метода накопления энергии и фактически об отсутствии параметров его оптимизации. Поэтому модифицируем систему, считая напряжение источника питания РД таким, которое изменяется на интервале времени  $T$  по некоторому закону  $u_{Д}(t)$ .

Коэффициент полезного действия системы, как и раньше, определяется выражением (1), но энергию  $E$  нужно находить согласно общей формуле

$$E = \int_0^T u_{Д}(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (10)$$

Найдем закон  $u_{Д}(t)$ , который обеспечивал бы максимальный коэффициент полезного действия или, что равнозначно, минимум выражения (10). Для удобства превратим формулу (6) путем перехода от напряжения  $u_{Д}(t)$  до зарядного тока  $i(t)$

$$E = E_R + \Delta E_C = R \int_0^T i^2(t) \cdot dt + \frac{1}{2} C (U_3^2 - U_{\partial}^2), \quad (11)$$

где  $E_R$  – энергия, рассеиваемая резистором  $R$  за время  $T$ .

Поскольку значение  $\Delta E_C$  задано, то для минимизации  $E$  достаточно минимизировать функционал  $J = \int_0^T i^2(t) \cdot dt$  с учетом

ограничения  $\int_0^T i(t) \cdot dt = C(U_3 - U_{\partial})$ .

Необходимое условие экстремума функционала  $J$  можно записать как

$$\frac{\partial}{\partial i} \left( \int_0^T i^2(t) \cdot dt + \lambda \int_0^T i(t) \cdot dt \right) = 0, \quad (12)$$

где  $\lambda$  – множитель Лагранжа.

Решение этого уравнения имеет вид

$$i(t) = -\lambda / 2 = const \quad (13)$$

Значение  $\lambda$  найдем из условия  $\int_0^T i(t) \cdot dt = -\frac{\lambda T}{2} = C(U_3 - U_{\partial})$ , т.е.



$$\lambda = -\frac{2C}{T}(U_3 - U_\partial), \text{ откуда}$$

$$i(t) = \frac{C}{T}(U_3 - U_\partial) = \frac{C}{T} \cdot \Delta U, \quad (14)$$

где  $\Delta U = U_3 - U_\partial$ .

На основе выражения (14) найдем оптимальный закон изменения напряжения источника питания

$$u_{Д}(t) = R \cdot i(t) + U_\partial + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) \cdot dt = \Delta U \left( \frac{RC}{T} + \frac{t}{T} \right) + U_\partial \quad (15)$$

Используя формулы (1), (10), (15), найдем коэффициент полезного действия оптимальной системы

$$\eta = \frac{U_3 + U_\partial}{\Delta U \left( 1 + \frac{2RC}{T} \right) + 2U_\partial} \quad (16)$$

Поскольку  $U_3 \gg U_\partial$ , то от формулы (16) целесообразно перейти к упрощенному выражению

$$\eta \approx \frac{T/RC}{2 + T/RC} \quad (17)$$

Из формулы (17) следует принципиальная возможность получения коэффициента полезного действия, близкого к единице, если обеспечено соотношения  $T \gg RC$ . Реальными ограничениями на пути к достижению этого неравенства есть потеря системой постоянства при малых значениях сопротивления R, недостаточный резерв энергии конденсатора при малом значении C, а также снижение скорости очистки при увеличении времени накопления энергии. Полученные результаты должны составить основу поиска разумного компромисса в процессе проектирования реальных систем.

### 3.3.4. Контроллер процесса азотирования

Качество обработки поверхности с применением ВДГРТ существенно зависит от соблюдения основных параметров режима - электрических характеристик разряда, влияющих на интенсивность процесса и температуры азотируемых деталей. При этом для повышения производительности желательно обеспечить ускоренный выход на режим без перегрева деталей и обусловленного этим отпуска, исключить аварийные ситуации, связанные с превышением значений напряжения, тока, при которых уже возможен переход тлеющего разряда в дуговой. Для этой цели известны, например,

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде* устройства [9], в которых с помощью коммутатора, срабатывающего по командам счетчика импульсов, периодически отключается один или несколько тиристорных регуляторов напряжения питания разрядной камеры. Кроме того, в подобных системах предусмотрено отключение системы регулирования в случае, когда ток в камере превысит определенное задаваемое значение. В другом варианте устройства могут управляться генератором с регулируемой частотой, устанавливаемой вручную и корректируемой сумматором и усилителем сигналов от термопар [10]. Возможно также регулирование с помощью триггера, управляемого транзисторным ключом, при этом электрические параметры поддерживаются близкими к теоретическим характеристикам тлеющего разряда [11]. По существу все перечисленные устройства соответствуют в большей или меньшей степени схеме циклически коммутируемого разряда, преимущества и недостатки которого рассматривались в главе 1. Недостатком названных устройств прежде всего является узкий набор функций, фактически сводящихся к выключению системы энергоснабжения в случае перехода тлеющего разряда в дуговой. При этом ввиду того, что в качестве исходного фактора используются значения напряжения или тока разряда, в алгоритме отключения появляется некоторая неоднозначность, так как во многих ситуациях изменение какого-либо из них без учета другого не является однозначным поводом для отключения питания. Периодическое же отключение некоторых импульсов (через определенное фиксированное число их) снижает эффективность поверхностного насыщения, то есть производительность процесса. В тех случаях, когда в качестве управляющего фактора принята температура, не контролируются нештатные ситуации, а сама система управления достаточно инерционна и поэтому не исключает перегрева деталей. Общим недостатком подобных систем является низкий уровень автоматизации процесса контроля и управления параметрами тлеющего разряда.

Указанных недостатков лишено устройство [11], подключаемое через низкочастотные фильтры одновременно к датчикам тока, напряжения разряда и температуры поверхности, имеющее системы сравнения этих параметров с задаваемыми, автоматического изменения управляющего напряжения тиристорного регулятора; алгоритмов идентификации нештатных ситуаций; селектор сигналов нештатных ситуаций и схемы задержки, восстановления управляющего напряжения, его сброса и аварийной ситуации. Благодаря такой структуре в устройстве могут быть заданы напряжение, сила тока разряда, температура детали, обеспечен автоматический выход на указанный параметр и его автоматическое

поддерживание, причем система выхода на параметр режима - адаптивная, учитывающая не только заданную скорость изменения параметра, но и состояние системы идентификации нештатных ситуаций, анализирующей параметры процесса по четырем критериям. При этом в зависимости от критерия нештатных ситуаций селектор сигналов нештатных ситуаций обеспечивает

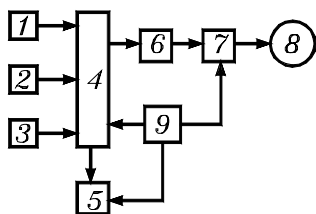


Рис. 3.23. Блок-схема устройства контроля и управления БАТР

включение схем или задержки и последующего экспоненциального восстановления управляющего напряжения, или сброса процесса и аварийной сигнализации. Это устройство предназначено для управления стационарным режимом с одновременным учетом дестабилизирующих факторов. Блок-схема устройства показана на рис. 3.23, а его структурная схема – на рис. 3.24.

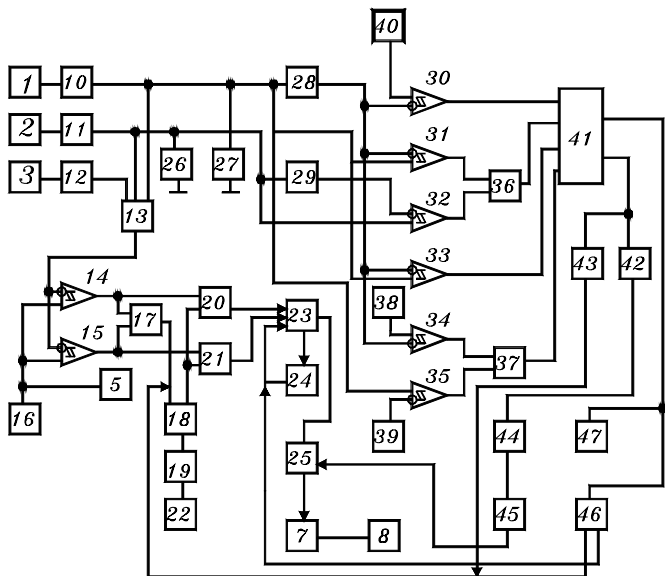


Рис. 3.24. Структурная схема устройства контроля и управления БАТР

Устройство контроля и управления процессом БАТР содержит датчики напряжения 1, силы тока 2, температуры поверхности 3,

которые подключаются к анализатору параметров 4. В качестве контрольно-измерительного прибора применен цифровой вольтметр 5. Сигналы состояния процесса азотирования обрабатываются в блоке управления и сигнализации 6, при этом на тиристорный регулятор напряжения 7, прикладываемого к электродам разрядной камеры 8, выдается управляющее напряжение, величина которого зависит от электрических параметров разряда и температуры детали, а также от их соответствия заданным значениям. Подключение датчиков 1, 2, 3 осуществлено через фильтры нижних частот 10, 11, 12 с переключателем 13, с помощью которого любой из датчиков соединяется с компараторами 14, 15, сравнивающими напряжение сигнала соответствующего датчика с опорным напряжением, формируемым регулируемым источником 16. Система автоматического изменения управляющего напряжения тиристорного регулятора состоит из логического элемента «И» 17, генератора счетных импульсов 18, ключей 19, 20, 21, генератора модулирующих импульсов инфранизкой частоты 22, реверсивного счетчика 23, схемы автосброса 24, цифроаналогового преобразователя 25. Система алгоритмов идентификации нештатных ситуаций включает интегрирующие RC – цепочки 26, 27, усреднители - масштабные множители тока 28 и напряжения 29 разряда, компараторы 30 – 35, логические элементы «И» 36 и «ИЛИ» 37, задатчики предельно допустимых значений среднего 38 и текущего 39 тока и порогового тока 40. В схему обработки сигналов нештатных ситуаций включены селектор 41, одновибратор отсечки 42, одновибратор фиксации счета 43, ключ 44, RC – схема экспоненциального восстановления опорного напряжения 45, схему сброса и прекращения процесса выхода на режим в случае аварийной ситуации 46 и устройства аварийной сигнализации 47.

Устройство работает следующим образом. Сигналы от датчиков 1-3 после прохождения через фильтры 10-12 сглаживаются и поступают в анализатор параметров процесса, в котором посредством переключателя 13 поочередно подаются на входы компараторов 14 и 15, где происходит их сравнение с опорным напряжением, которое устанавливается вручную и выдается источником 16. В ходе установки того или иного значения параметра визуальный контроль осуществляется с помощью цифрового вольтметра 5. Сигналы на выходе компараторов поступают на вход логического элемента «И» и в случае, если фактический параметр соответствует заданному, с выхода элемента 17 на генератор 18 поступает сигнал запрета. Реверсивный счетчик 23, управляемый в зависимости от их уровня сигналами от компараторов 14, 15 и генератора 18 через ключи 20 и 21 ведет

прямой и обратный счет, а цифроаналоговый преобразователь 25 соответственно увеличивает или уменьшает управляющее напряжение тиристорного регулятора 7, что приводит к изменению напряжения на электродах камеры 8. Если текущее значение параметра меньше заданного, то сигнал запрета на генератор 18 не подается и счетные импульсы, которые он вырабатывает в виде серий, длительность пауз между которыми для удобства реализации схемы генерирования устанавливается через ключ 19 генератором модулирующих импульсов инфранизкой частоты 22, через счетчик 23 увеличивают посредством цифроаналогового преобразователя 25 управляющее напряжение регулятора 7, что и увеличивает напряжение на электродах камеры 8. Схема автосброса 24 служит для предотвращения обратного счета реверсивным счетчиком 23 если он находится в состоянии, близком к нулю, так как в этом случае возможен переход ввиду отсутствия области отрицательных значений на максимальное состояние счетчика, а соответственно на максимальное значение управляющего напряжения, то есть будет получено противоположное требуемому. Скорость приращения напряжения может ступенчато изменяться настройкой генератора 22. Для более стабильной работы блока управления сигнализации 6 за счет дополнительной фильтрации (сглаживания) сигналов датчиков тока и напряжения в систему алгоритмов идентификации нештатных ситуаций включены интегрирующие RC – цепочки 26 и 27.

Система алгоритмов нештатных ситуаций оценивает состояние параметров разряда по четырем видам критериев.

1. Микродуга в области малых токов идентифицируется по условиям значения среднего тока, которое меньше или равно пороговому, установленному задатчиком 40, и многократному превышению мгновенным током среднего значения (коэффициенты кратности здесь и далее реализованы по результатам экспериментальных исследований процесса).

2. Дуга в области больших токов, что в отличие от первого критерия, характерного для фазы очистки поверхности катодной бомбардировкой, больше соответствует собственно процессу диффузионного насыщения, распознается по условиям, когда среднее значение тока больше порогового по задатчику 40, мгновенное напряжение меньше среднего значения напряжения, а мгновенное значение тока превышает среднее с учетом поправочных коэффициентов, из которых коэффициент среднего напряжения меньше единицы, а коэффициент среднего тока больше единицы. Сочетание факторов падения напряжения при резком увеличении тока в области его существенных значений однозначно соответствует переходу тлеющего разряда в дуговой.

3. Аварийная ситуация, при которой среднее значение силы тока больше или равно максимально допустимому среднему значению, установленному задатчиком 38.

4. Аварийная ситуация, соответствующая мгновенному току, равному или превышающему максимально допустимое значение тока, регламентированное задатчиком 39.

Система алгоритмов идентификации нештатных ситуаций реализована на компараторах, причем для критерия 1 используются компараторы 30 и 33, для критерия 2 соответственно 31 и 32, состояние параметров процесса по критерию 3 оценивается с помощью компаратора 34, а по критерию 4 – 35. Компараторы 31 и 32 включены на вход логического элемента «И» 36, а 34 и 35 – на вход логического элемента «ИЛИ» 37, так как реакция устройства контроля и управления на ситуации, соответствующие критериям 3 и 4 идентична. Усреднители-умножители 28 и 29 используются для выделения средних составляющих тока или напряжения и умножения их на соответствующие поправочные коэффициенты. Дальнейшая обработка сигналов, снимаемых с выходов компараторов 30 и 33, логических элементов 36 и 37 проходит в селекторе 41, который в зависимости от соответствия электрических



*Рис. 3.25. Лицевая панель контроллера управления АТР*

параметров разряда тому или иному критерию вырабатывает ту или иную линию реакции на дестабилизирующие факторы. При ситуациях, соответствующих критериям 1 и 2, включаются одновибратор фиксации счета 43, который выдает сигнал запрета счета генератору 18, и одновибратор отсечки 42, отключающий сначала опорное напряжение цифроаналогового преобразователя 25, а затем после определенной выдержки посредством ключа 44 и РС – схемы 43 экспоненциально восстанавливающий его, но

продолжение увеличения напряжения возможно только после окончания фиксированной задержки счета. В случае аварийной ситуации (критерии 3 и 4) срабатывает схема сброса процесса выхода на режим или собственно азотирования 46, которая обесточивает разрядную камеру 8, установив счетчик 23 в нулевое положение и выключив генератор счетных импульсов 18. Процесс

может быть начат сначала только повторным запуском после выяснения и устранения причин аварии. Одновременно включается аварийная сигнализация 47. Один из возможных конструктивных вариантов контроллера процесса АТР показан на рис. 3.25. По приведенному выше описанию принцип действия устройства управления и контроля может быть реализован на любой современной элементной базе.

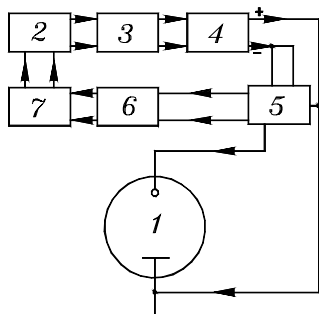
### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Пастух І. М. Організаційно-економічні передумови впровадження газорозрядних вакуумно-дифузійних технологій модифікації поверхні металів. – Хмельницький: Вісник ТУП;- 2001;- №6; С. 126-133.
2. Прочность, устойчивость, колебания/ Справочник в 3-х томах под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968, т.1 – 831 с., т. 2 – 463 с., т.3 – 568 с.
3. Бидерман В. Л. Механика тонкостенных конструкций. Статика. – М.: Машиностроение, -1977, 488 с.
4. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1976, 408 с.
5. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки/ Пер. с англ., М.: Физматгиз, 1963, с. 636.
6. Спосіб іонно-плазмового зміцнювання поверхні металів та пристрій для його здійснення. Патент України № 20151А від 30.04.98.
7. Д.Н. Попов. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М.: Машиностроение, 1976. –424 с.
8. Каганов И. Л. Ионные приборы, - М.: Энергия, 1972, 528 с.
9. Патент ФРГ № 3207335, С23С11/14, 1983 г.
10. Патент ФРГ №1912114, 48в11/14, 1969 г.
11. Патент Швейцарии №561285, С23С11/14, Н02М 7/12, 1975 г.
12. Давыдов А. М., Пастух И. М., Каплун В. Г. Устройство контроля и управления процессом ионного азотирования. Патент Российской Федерации № 2020191.

### **3.4. Практическая реализация процесса АТР**

Ниже изложены некоторые предложения по практике применения БАТР, полный перечень которых для более детального ознакомления приведен в конце раздела [1-32].

В главе 1 сопоставлялись установки с постоянным и циклически коммутируемым разрядом. Преимуществ прерывистого питания установок можно достичь предлагаемым ниже методом. Поставленная задача создания системы питания разрядных камер пульсирующим током, которая обеспечивала бы надежное и непрерывное питания разрядной камеры при недопущении перехода тлеющего разряда в дуговой, решается за счет того, что система питания дополнительно включает генератор управляющих сигналов, частота которых устанавливается такой, чтобы период был



*Рис. 3.26. Схема установки с пульсирующим питанием*

меньшим времени перехода тлеющего разряда в дуговой (рис. 3.26). Система питания работает следующим чином. В случае, если блок идентификации перехода тлеющего разряда в дуговой 5, датчик тока которого подключен последовательно с разрядной камерой 1, а датчик напряжения - параллельно ей, согласно заложенному в него алгоритму установит приближение момента перехода, то он через

переключатель 6, служащий для включения ручного или автоматического режимов работы, подает корректирующий сигнал на вход задатчика частоты 7. Задатчик 7 может работать как в режиме ручной установки частоты, так и в автоматическом. В последнем варианте он подключается к блоку идентификации перехода тлеющего разряда в дуговой 5. Задатчик 7 увеличивает частоту колебаний генератора управляющих сигналов 2, который устанавливает форму и величину напряжения на выходе регулируемого источника тока 3 и, соответственно, на выходе выпрямителя 4, к которому подключены электроды разрядной камеры 1. Процесс длится, пока частота напряжения не станет такой, при которой период колебаний будет меньшим за время перехода тлеющего разряда в дуговой. Регулирование возможно и в ручном режиме. В этом случае переключателем 6 от задатчика 7 отключается блок идентификации перехода тлеющего разряда в



дуговой 5, вручную устанавливается максимальная частота колебаний, которая постепенно уменьшается к границе визуального отслеживания перехода тлеющего разряда в дуговой. В последнем варианте возможен лучший учет особенностей объектов модификации, например - их формы. Справедливости ради следует отметить, что подобная схема может работать только в стабильной фазе азотирования, будучи применяемой, например, для АТР деталей с глубокими отверстиями и другими подобными локальными исключениями.

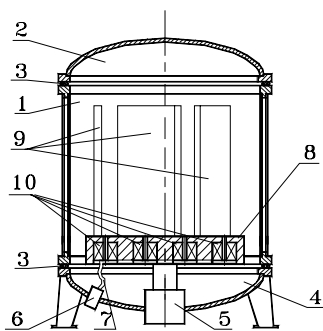


Рис. 3.27. Схема установки

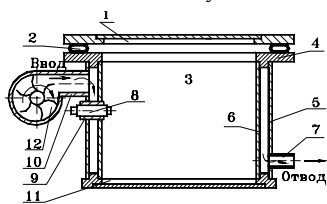


Рис. 3.28. Установка с воздушным охлаждением

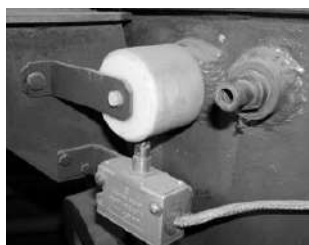
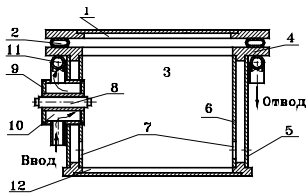


Рис. 3.29. Токовод катода с блокировкой и охлаждением

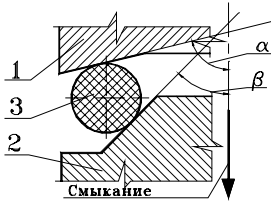
В случае, когда предстоит азотировать детали типа пластинок (лопатки), причем проблематично их закрепление, применима установка, схема которой показана на рис. 3.27. Стол 8 установлен на изоляторе - токовводе катода 5, благодаря чему стол и размещенные на нем обрабатываемые объекты 9 являются катодом (анод - корпус камеры). После подачи тока через дополнительный токовод 6, термостойкий кабель 7 электромагниты 10 надежно удерживают обрабатываемые объекты 9 в любом положении, в том числе - и на узкой грани, одновременно упрощая загрузку садки.

Традиционно камеры охлаждаются водяной системой, которая может быть как замкнутого, так и нерегенеративного типов. В установках с замкнутым контуром водяного охлаждения возникают проблемы с емкостью для хранения и остывания воды, так как она занимает значительную площадь цеха и повышает влажность. Однако охлаждение может осуществляться и от воздушной системы, схема которой показана на рис. 3.28. Несмотря на несколько больший

расход электроэнергии непосредственно на установке, представляется возможность реализации простой схемы утилизации тепла. Существенным замечанием к этой схеме будут рекомендации относительно места установки токоввода катода. Для упрощения его конструкции и обеспечения возможности применения в качестве надежных уплотнителей мягких материалов рекомендуется при



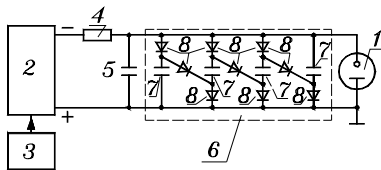
*Рис. 3.30. Камера с вакуумным охлаждением*



*Рис. 3.31. Вариант уплотнения*

3.1, где вакуумный шнур закладывался в клиновидный паз во фланце корпуса или крышки. Недосток подобной конструкции состоит в ненадежном уплотнении по мере удлинения шнура. Возможный вариант съемного уплотнителя, не требующего клиновидной канавки, показан на рис. 3.31.

Блок энергопитания – один из наиболее ответственных не



*Рис. 3.32. Принципиальная схема диодно-конденсаторной системы питания установки*

только по определению, но и с точки зрения экономичности установок (см. главу 4). Поэтому выбор оптимального варианта принципиальной схемы имеет существенное значение для себестоимости обработки. Один из них показан на рис. 3.32.

Диодно-конденсаторная система питания процесса

очистки поверхности металлических изделий состоит из

регулируемого источника питания 2, блока автоматического отключения в случае перехода микродуг в общий дуговой разряд 3, балластного резистора 4, но отличается тем (см. 3.3), что дополнительно включает вспомогательный конденсатор 5 и диодно-конденсаторный блок 6, который автоматически переключает конденсаторы накопителя энергии на последовательное соединение в режиме зарядки и на параллельное - при разряде.

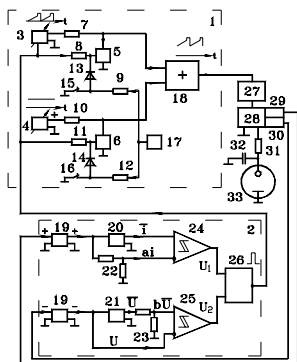


Рис. 3.33. Схема управления процессом ОМКР

В развитие изложенного в 3.3.4 предложена схема системы управления процессом ОМКР, которая состоит из устройства автоматического управления регулируемым источником питания разрядных камер, кроме того, дополнительно включает блок оптимального регулирования в составе генераторов импульсов программированной формы и регулируемого постоянного напряжения, электронных ключей, а также резисторно-диодных сумматора, коммутационных

линий; блока автоматического отключения в составе фильтров низких частот, интегрирующих звеньев, аналоговых компараторов, логического элемента “ИЛИ-НЕТ”.

Сигналы мгновенных значений тока  $i$  и напряжения  $u$  снимаются с датчиков тока 29 и напряжения 30, которые смонтированы на выходе выпрямителя 28, проходят через фильтры нижних частот 19 блока автоматического отключения 2. Дальше обработка каждого сигнала ведется двумя путями: после интегрирующего звена 20 получаем среднее значение тока  $\bar{i}$ , а через делитель 22 – уменьшенное в соответствующем масштабе значение мгновенного тока  $ai$ ; после интегрирующего звена 21 и делителя 23 получают уменьшенное в соответствующем масштабе значение среднего напряжения  $b\bar{u}$ . Средний ток  $\bar{i}$  и уменьшенное в масштабе значение мгновенного тока  $ai$  подаются на компаратор 24, уменьшенное в масштабе значения среднего напряжения  $b\bar{u}$  и мгновенное значение напряжения  $u$  – соответственно на компаратор 25. Логика идентификации дугового разряда сводится к следующему: если уменьшенное в масштабе значения мгновенного тока  $ai$  превышает или равно среднему току  $\bar{i}$ , то на выходе компаратора 24 формируется сигнал  $U_1$  уровня логического нуля;

если мгновенное значение напряжения  $u$  превышает (следует учесть, что напряжение отрицательное) уменьшенное в масштабе значения среднего напряжения  $b\bar{u}$ , то на выходе компаратора 25 формируется сигнал  $U_2$  уровня логического нуля; наконец если на выходах компараторов 24 и 25 одновременно сигналы  $U_1$  и  $U_2$ , которые отвечают логическим нулям, то это квалифицируется как дуговой разряд и на выходе логического элемента “ИЛИ-НЕТ” 26 формируется сигнал отключения, который подается на электронные ключи 5 и 6 соответственно через резисторы 8 и 11 и на управляющий вход генератора импульсов программированной формы 3. Масштабные коэффициенты  $a$  и  $b$  выбираются экспериментально из условия компромисса между скоростью процесса очистки и чувствительностью системы к переходу локальных микродуг в дуговой разряд, оба коэффициента меньше нуля. Блок оптимального регулирования 1 предназначен для формирования управляющих импульсов, подаваемых на управляющий вход регулируемого источника питания 27. Поскольку скорость процесса зарядки накопителя энергии 32 через балластный резистор 31 влияет на производительность именно процесса очистки, то уместно было обеспечить питание резистора и накопителя напряжением, циклически изменяющимся по определенному закону, что и достигается подачей на управляющий вход регулируемого источника питания 27 управляющих импульсов. Управляющие импульсы формируются сумматором 18 с двух составляющих: переменной, которая создается генератором импульсов программируемой формы 3 и подается через резистор 7 на один из входов сумматора 18, и постоянной, которая создается генератором регулируемого постоянного напряжения 4 и подается через резистор 10 на второй вход сумматора 18. Постоянная составляющая выбирается из условия зажигания тлеющего разряда. Форма управляющего импульса обеспечивает заряд накопителя энергии 32 через резистор 31 с постоянной скоростью и в конце процесса зарядки провоцирует микродугу на поверхности деталей в разрядной камере 33, что приводит к сгоранию оксидов и очистке поверхности перед процессом модификации. Поскольку емкость накопителя конечна, то микродуга не может перейти в глобальный дуговой разряд, чем обеспечиваются высокие скорость и качество очистки, отсутствие локального оплавления поверхности и эффективность работы системы в целом.

Недостатком традиционной схемы питания установок для АТР является нерациональное использование возможностей блока питания, которые определяются в первую очередь повышающим трансформатором. При выполнении фазы ОМКР напряжение на

электродов разрядной камеры должно быть постепенно увеличено до 1200 В, но ток в этом случае незначительный. Наоборот, в фазе

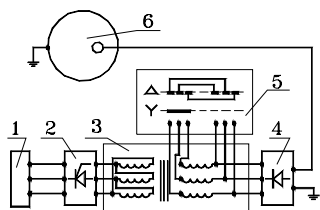


Рис. 3.34. Схема двухступенчатого блока питания

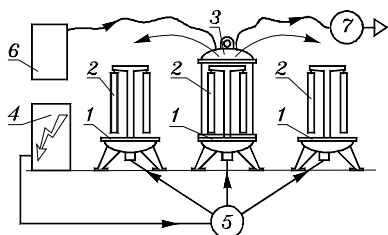


Рис. 3.35. Схема многопозиционной установки

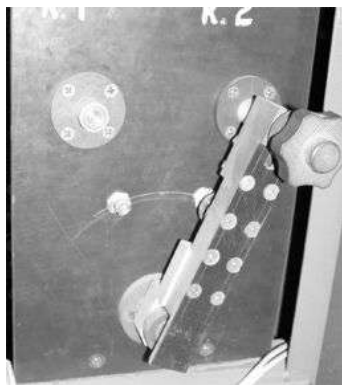
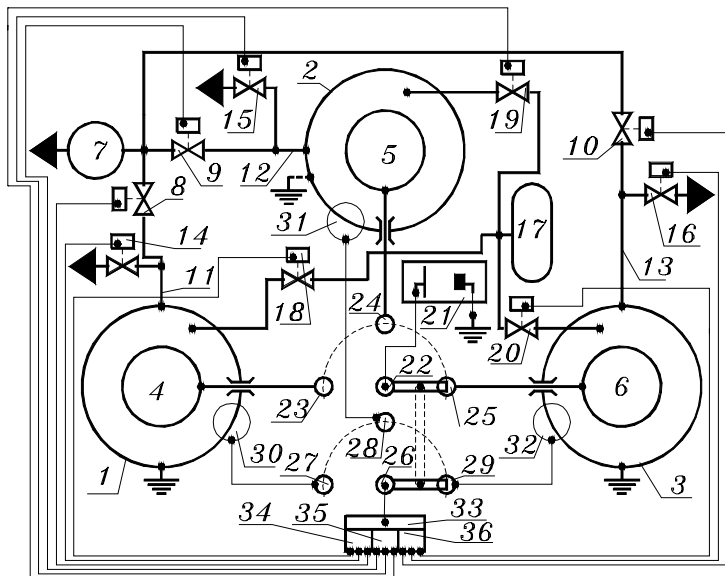


Рис. 3.36. Общий вид коммутатора высокого напряжения

собственно процесса напряжение не превышает 600 В, но ток при этом желательно получить по возможности большим. Объединение этих двух требований делает необходимым применения мощного трансформатора, что увеличивает стоимость установки.

В случае применения двухступенчатого блока питания, схема которого показана на рис. 3.34, установка дополнительно включает переключатель соединений вторичных обмоток трансформатора.

Принципиальная схема многопозиционной установки показана на рис. 3.35. По мере готовности садки 2 на определенном посту 1 корпус камеры с помощью цеховых грузоподъемных устройств переставляется на новую позицию. С помощью коммутаторов 5-7 к рабочему стенду подключаются электрическая, вакуумная и газовая системы. Общий вид коммутатора высокого напряжения установки показан на рис. 3.36.



*Рис. 3.37. Принципиальная схема трехкамерной установки*

Определенную сложность представляет формирование взаимосвязи функций многокамерных установок. Принципиальная схема трехкамерной установки показана на рис. 3.37. Установка работает следующим образом. В одну из камер 1, 2, или 3, в которой в данное время предполагается провести процесс АТР, загружается изделие 4, 5 или 6, причем все камеры заземлены, а поскольку заземлен положительный полюс источника питания 21, то корпуса камер являются анодами. Коммутатор высокого напряжения 22 переключается на одну из позиций 23, 24, 25, что соответствует рабочей камере, таким образом, обрабатываемое изделие 4, 5 или 6 соединяется с коммутатором высокого напряжения 22, а поскольку центральная шина его соединена с отрицательным полюсом источника питания 21, то изделие является катодом. Коммутатор высокого напряжения 22 жесткой механической связью соединен с коммутатором системы управления 26, который подключает через позиции 27, 28 или 29 аппарат блокирования камер 30, 31 или 32 к системе управления 33, что обеспечивает управляющую роль только одному из блоков управления камерами 34, 35 или 36. С их помощью возможно подключение только рабочей в данное время разрядной камеры через клапаны вакуумного коммутатора 8, 9 или 10 и вакуумные системы 11, 12 или 13 к вакуумному насосу 7, в

*Глава 3.* Оборудование для реализации процесса  
камере создается вакуум, необходимый для проведения соответствующих фаз процесса; через клапаны газового коммутатора 18, 19 или 20 - с системой подготовки газовой среды 17, в камерах создается необходимая по технологическому режиму газовая атмосфера требуемого давления; невозможно включение одного из клапанов разгерметизации 14, 15 или 16, который соответствует рабочей разрядной камере.

Некоторые устройства реальных систем установок для АТР показаны на рис. 3.38-3.47.



*Рис. 3.38. Центральная подвеска*



*Рис. 3.39. Камера с разъемным корпусом*



*Рис. 3.40. Вакуумный*



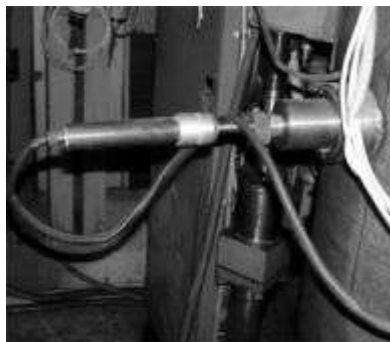
*Рис. 3.41. Пульт управления*



*Рис. 3.42. Токоввод с автономным охлаждением*



*Рис. 3.43. Трехточечная подвеска для массивных деталей (до 1000 кг)*



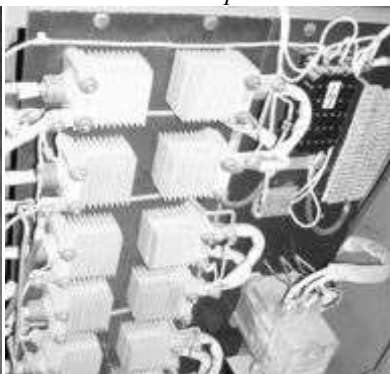
*Рис. 3.44. Терморadiационный пирометр*



*Рис. 3.45. Система очистки газовой среды*



*Рис. 3.46. Токоввод подвески*



*Рис. 3.47. Выпрямитель с*



### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Способ нанесения износостойких покрытий в вакууме. А/с № 1506932. Каплун В. Г., Каратеев А. М., Паршенко А. В., Пастух И. М.
2. Токоввод катода установок ионного азотирования. А/с № 1716292. Пастух И. М., Каплун В. Г., Добжанский Ю. Ф., Паршенко А. В.
3. Способ азотирования стальных изделий. А/с № 1687645. Каплун В. Г., Каратеев А. М. Пастух И. М.
4. Установка ионного азотирования в вакууме. А/с № 1693117. Каплун В. Г., Пастух И. М., Силина Л. А., Леськив В. М.
5. Камера розрядна для хіміко-термічної обробки в тліючому розряді. Патент України № 20919А від 07.10.97. Пастух І. М., Каплун В. Г.
6. Спосіб підвищення зносостійкості обробляючого інструменту. Патент України № 21352А від 3.01.97. Пастух І. М., Каплун В. Г.
7. Спосіб іонного азотування азотоактивних металів. Патент України № 22650А від 3.01.97. Пастух І. М., Каплун В. Г.
8. Стумовід установок іонно-плазмового зміцнення. Патент України № 21351А від 3.01.97. Пастух І. М.
9. Спосіб отримання комбінованих покриттів тугоплавких металів. Патент України № 22015А від 30.04.98. Пастух І. М., Каплун В. Г., Олександренко В. П., Пилипів О. В.
10. Спосіб іонно-плазмового зміцнювання поверхні металів та пристрій для його здійснення. Патент України № 20151А від 30.04.98. Пастух І. М.
11. Спосіб дифузійного зміцнювання та пристрій для його здійснення. Патент України № 20150А від 30.04.98. Пастух І. М., Каплун В. Г., Паршенко А. В.
12. Спосіб дифузійного зміцнення оброблювального інструменту. Патент України № 23953А від 31.08.98. Пастух І. М., Каплун В. Г., Паршенко А. В.
13. Пристрій для іонно-дифузійного зміцнення поверхні металів. Патент України № 23954А від 31.08.98. Пастух І. М., Давидов А. М., Давидов В. А.
14. Клапан вакуумний . Патент України № 23955А від 31.08.98. Пастух І. М.
15. Пристрій для комутації датчиків струму та напруги установок іонного дифузійного зміцнювання. Патент України № 23952А від 31.08.98. Пастух І. М., Давидов А. М., Давидов В. А.

16. Камера розрядна з повітряним охолодженням. Патент України на корисну модель № 573 від 16.10.2000. Пастух І. М.
17. Камера розрядна для зміцнення тонких пластинок. Патент України на корисну модель № 576 від 16.10.2000. Пастух І. М.
18. Розрядна камера з вакуумованою оболонкою. Патент України на корисну модель № 574 від 16.10.2000. Пастух І. М.
19. Камера розрядна комбінованого типу. Патент України на корисну модель № 575 від 16.10.2000. Пастух І. М.
20. Багатокамерна установка для дифузійного зміцнення поверхні металевих виробів. Патент України № 31606А від 15.12.2000. Пастух І. М.
21. Установка для поверхневого зміцнення металів з двоступеневим блоком живлення. Патент України № 31607А від 15.12.2000. Пастух І. М.
22. Герметизуючий стик вакуумних установок поверхневого зміцнення металів. Патент України № 31608А від 15.12.2000. Пастух І. М.
23. Багатопозиційна установка для поверхневого зміцнення металів. Патент України № 31609А від 15.12.2000. Пастух І. М.
24. Діодно-конденсаторна система живлення процесу очищення поверхонь металевих виробів. Патент України № 51901А від 16.12.2002. Пастух І. М., Давидов А. М., Здибель О. С., Лотоцька І. А.
25. Система управління процесом очищення поверхонь металів катодним розпиленням. Патент України № 51903А від 16.12.2002. Пастух І. М., Давидов А. М., Здибель О. С., Лотоцька І. А.
26. Багатопозиційна установка для вакуумно-дифузійної газорозрядної модифікації металів. Патент України № 51904А від 16.12.2002. Пастух І. М.
27. Спосіб модифікації поверхні сталевих виробів. Патент України № 51905А від 16.12.2002. Пастух І. М.
28. Спосіб вакуумно-дифузійного газорозрядного азотування. Патент України № 51906А від 16.12.2002. Пастух І. М.
29. Спосіб очищення поверхні металевих виробів. Патент України № 51908А від 16.12.2002. Пастух І. М.
30. Блок живлення розрядної камери для модифікації поверхні металів. Патент України № 51909 від 16.12.2002. Пастух І. М., Давидов А. М., Здибель О. С., Лотоцька І. А.
31. Система живлення розрядної камери пульсуючим струмом. Патент України № 51910 від 16.12.2002. Пастух І. М.
32. Устройство контроля и управления процессом ионного азотирования. Патент Российской Федерации № 2020191. Давыдов А. М., Пастух И. М., Каплун В. Г.

## ГЛАВА 4

### ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ВНЕДРЕНИЯ БАТР

#### 4.1. Особенности нормирования и экономических показателей вспомогательных процессов ВДГРТ обработки деталей

Вспомогательные фазы ВДГРТ модификации поверхности металлических деталей, в которые входят операции, связанные с подготовкой деталей к обработке, формированием садки и т.п., занимают весомую долю в продолжительности всего цикла [1]. Тяжело переоценить определяющую роль процессов подготовки металлических деталей к обработке с помощью ВДГРТ. Отсутствие ее или игнорирование качественным выполнением, как правило, приводит в лучшем случае к получению конечных результатов, существенно отличающихся от запланированных или даже противоположных. Но в большинстве случаев следствием недоброкачественной подготовки может стать вообще невозможность самого процесса. Например, когда поверхность не очищена от оксидов, то попытка проведения первой фазы процесса - катодного распыления приведет к интенсивному газовыделению продуктов распада этих оксидов, невозможности создания в разрядных камерах нужного вакуума и полностью заблокирует диффузию активных компонентов в поверхность. Аналогичные сложности чисто конструктивного характера могут возникнуть, когда на поверхности есть локальные исключения, обработка которых необязательна, тем не менее, они будут оказывать содействие локальному переходу тлеющего разряда в дуговой, т.е. опять таки не разрешат выдерживать технологические параметры режима. Не менее важными могут стать в случае наличия особых технических требований процедуры, целью которых являются уточнение параметров технологического режима с учетом условий будущей эксплуатации, детальные исследования конечных характеристик модификации и т.п..

Тем не менее вспомогательные операции, поскольку они проходят вне разрядных камер, очень часто не учитываются в аспекте затрат работы, материалов, энергетических ресурсов, что деформирует представление о действительных экономических показателях технологии. Главная причина этого состоит прежде

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
всего в отсутствии методологии нормирования затрат на подготовку, спонтанный, часто случайный характер включения их в общие затраты. Кроме того, как это будет ниже продемонстрировано классификацией подготовительных операций, сохранение их полной номенклатуры без разумного группирования может существенно усложнить методику определения стоимости обработки.

Классификация объектов обработки по критерию сложности подготовки сводится к следующему.

1. По наличию локальных особенностей деталей, которые усложняют модификацию:

- с острыми, высокими и тонкими ребрами;
- со значительной шероховатостью поверхности, ребер и т.п.
- с пазами и отверстиями относительно больших размеров;
- с узкими и глубокими пазами;
- с отверстиями малого диаметра, в том числе - сквозными и глухими;

с отверстиями малого диаметра, в том числе - сквозными и глухими;

с относительно глубокими отверстиями, которые подлежат обработке;

с выходами на поверхность пустот - дефектов

с неустойчивой опорной поверхностью или невозможностью установки детали на нерабочую поверхность.

2. По виду поверхностных препятствий к модификации:

- 2.1 с загрязнениями, жировыми пленками;
- 2.2 с лакокрасочными покрытиями;
- 2.3 с гальваническими покрытиями;
- 2.4 с поверхностными слоями коррозионного происхождения;
- 2.5 с нагаром на поверхности (сажей, твердыми остатками смазочных масел и т.п.);

2.6 с нагаром (отложениями) внутри узких пазов;

2.7 с нагаром (отложениями) внутри отверстий.

3. Специальные требования:

3.1 с ограничениями модификации на отдельных участках поверхности;

3.2 с ограничениями модификации объемов цилиндрической формы;

3.3 с ограничениями модификации объемов сложной формы;

3.4 с требованиями точного контроля локальной температуры;

3.5 с требованиями металлографических исследований модифицированных слоев;

3.6 с необходимостью исследований по отработке оптимальных режимов обработки согласно условиям эксплуатации;

3.7 с дополнительными условиями финишной обработки;

3.8 с другими дополнительными требованиями технических

Глава 4. Организационно-экономические предпосылки внедрения БАТР условий заказчика.

4. По уровням объемов подготовки (масса детали или площадь обработки):

- 4.1 масса детали до 1 кг;
- 4.2 масса детали от 1 до 10 кг;
- 4.3 масса детали от 10 до 20 кг;
- 4.4 масса детали от 20 до 100 кг;
- 4.5 масса детали больше 100 кг;
- 4.6 площадь обработки до 100 см<sup>2</sup>;
- 4.7 площадь обработки от 100 до 1000 см<sup>2</sup>;
- 4.8 площадь обработки от 1000 до 5000 см<sup>2</sup>;
- 4.9 площадь обработки больше 5000 см<sup>2</sup>.

Идентификацию конкретных вспомогательных процессов представляют, как правило, комбинации одного или нескольких факторов с первых трех разделов классификации и уровней градации из четвертого раздела. Система обозначения факторов, которые должны учитываться как дополнительные, в том числе – и при подготовке объекта к обработке, может иметь вид цифровой структуры в виде совокупности любого критерия и последнего числа уровня градации объема подготовки, например (156.217.351) соответствует детали, у которой есть отверстия малого диаметра общей площадью до 100 см<sup>2</sup>, загрязнениями (жировыми пленками) по всей площади поверхности от 100 до 1000 см<sup>2</sup> и с дополнительными требованиями проведения металлографических исследований в полном объеме (объем регламентируется техническими условиями).

Перечень операций вспомогательных процессов и их применение, а также составляющие затрат приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

**Основные операции вспомогательных процессов, их применение и перечень видов затрат**

Код	Состав вспомогательной операции	Применение	Виды затрат
1	2	3	4
1	Проектирование, изготовление и монтаж специальных грузонесущих органов (подвесок, этажерок, столов и т.п.)	4.4, 4.5	ОК
2	Механическое удаление твердых или консистентных инородных веществ на поверхности деталей	2.5	ПР
3	То же, в открытых пазах и отверстиях	1.3, 2.6	ПР

1	2	3	4
4	То же, в глухих пазах и отверстиях	2.7	ПР
5	Снятие заусениц, облоя, закругление острых ребер	1.1	ПР, А
6	Улучшение класса шероховатости поверхности	1.2	ПР, А
7	Проектирование, изготовление и установка заглушек на локальные исключения, которые не подлежат обработке	1.5, 3.1-3.3	ПК, ПКР, М, Е
8	Проектирование, изготовление, установка вспомогательного анода (анодов) во внутренние объемы, которые подлежат обработке	1.6	ПК, ПКР, М, Е
9	Заваривание, дополнительная обработка выходов пустот на поверхность, в которых может возникнуть локальный дуговой разряд	1.7	Е, ПКР, МЗ
10	Проектирование, изготовление и установка заглушек выходов на поверхность пустот сложной конфигурации	1.7	ПК, ПКР, М, Е
11	Разработка выходов пустот сложной конфигурации в объемы цилиндрической или другой простой формы с последующей установкой заглушек	1.7	ПКР, М, Е
12	Отмачивание частей поверхности, локальных исключений, жидкостью-растворителем или веществом-преобразователем инородных веществ	2.2, 2.5-2.7	РП-Р, ПР
13	Смывание с поверхности и из локальных исключений растворенных инородных веществ	2.2, 2.5-2.7	ПР, В
14	Обезжиривание поверхности моющими средствами	Все	ПР, В, МЗ, Е-Т
15	Обезжиривание (промывка, протирка) поверхности органическими веществами	2.1, 2.2	РО, ПР, ДМ
16	Травление гальванических покрытий	2.3	РТ, ПКР
17	Механическое удаление гальванических покрытий	2.3	ПКР, А
18	То же, лакокрасочных покрытий	2.2	ПР, А
19	Промывка поверхности водой	Все	ПР, В
20	Сушка деталей	Все	Е-Т, ПР

Глава 4. Организационно-экономические предпосылки внедрения БАТР

1	2	3	4
21	Механическое удаление слоев коррозионного происхождения вручную	2.4	ПР, А
22	То же, на универсальном оборудовании	2.4	ПКР, Е, АМ
23	То же, на специальном оборудовании	2.4	ПКР, Е, АМ
24	Травление слоев коррозионного происхождения	2.4	РТ, ПКР
25	Нагревание (в том числе – циклические) деталей в разрядной камере для разрушения твердых отложений с последующим удалением газов – продуктов распада вакуумированием	2.6	ВРУ
26	Проектирование, изготовление, установка экранов на участки поверхности, объемы, которые в обязательном порядке не подлежат обработке	1.4, 3.1-3.3	ПК, ПКР, М, Е
27	Проектирование, изготовление, установка специальных устройств для подведения тока	1.6, 4.5	ПК, ПКР, М, МП, МК, Е
28	Проектирование, изготовление приспособлений для захвата и закрепления деталей, не имеющих надежной опоры или опоры на нерабочую поверхность или опоры малых размеров	1.8	ОК
29	Финишная доводка, удаление по требованиям технических условий заказчика поверхностного напыления	3.7, 3.8	ПР, ДМ
30	Удаление по требованиям технических условий заказчика некоторых фазовых слоев, недопустимых для эксплуатации	3.7, 3.8	ПКР, А, ДМ, РО, Е
31	Проектирование и изготовление эталон-свидетелей обработки	Все	ПКР, М, Е
32	Проектирование, изготовление и установка по требованиям технических условий дополнительных систем измерения температуры	3.4, 3.8	ПК, ПКР, М, МК, Е, ПД
33	Изготовление свидетелей для последующих металлографических исследований	3.5	ПКР, М, Е
34	Проведение металлографических исследований после обработки деталей	3.5, 3.8	ПД, Е, А, РТ

1	2	3	4
35	Экспресс-контроль поверхностной микротвердости или общей твердости до и после обработки	Все	ПД-ПКР
36	Предварительные металлографические исследования	3.6, 3.8	ПД, Е, А, РТ
37	Предварительные исследования для отработки оптимальных параметров технологического режима обработки с учетом конкретной конструкции, свойств деталей и эксплуатационных требований к ним	3.6, 3.8	ПД, ВРУ, ОК
38	Исследование (участие в совместных исследованиях) для уточнения эксплуатационных свойств объектов после обработки, коррекция при необходимости параметров режима	3.6, 3.8	ПД, ОК
39	Разработка детального отчета с обоснованием рекомендаций относительно дальнейшей обработки деталей	3.8	ПД, ОК
40	Подготовка протоколов обработки деталей	3.4, 3.8	ПД-ПКР
41	Формирование и расформирование садки	Все	ПР

В колонке видов затрат табл. 4.1 применены условные обозначения, которые расшифровываются табл. 4.2. Знак тире (-) условно обозначает возможные варианты видов затрат, их применение зависит от конкретных условий исполнителя. Следует также принять во внимание, что при расчете стоимости тех или иных операций в обязательном порядке необходимо учитывать накладные и другие затраты общего назначения на основе нормативов, сложившихся у производителя работ по модификации деталей. При этом согласовывается мера участия этих показателей в определении стоимости одного часа работы установки таким образом, чтобы не допустить дублирования этих статей в общей стоимости выполнения заказа.

Естественно, в условиях каждого конкретного исполнителя доля этих и подобных им затрат может значительно отличаться. Кроме того, не всегда имеется возможность выполнять полный комплекс вспомогательных операций из перечисленных в табл. 4.1. В тех случаях, когда набор технологических операций по тому или иному виду подготовки деталей к обработке допускает многовариантность, в конкретных условиях производства могут сложиться типовые маршруты, объединяющие несколько операций.



Глава 4. Организационно-экономические предпосылки внедрения БАТР

Существенное снижение себестоимости вспомогательных операций можно получить, применяя специализированное оборудование для подготовки деталей к обработке, однако в этом случае должны учитываться объемы предстоящих работ.

Таблица 4.2

**Условные обозначения видов затрат при расчете стоимости  
вспомогательных операций**

Обозначение	Расшифровка видов затрат
А	Затраты абразивного инструмента (шлифовальная шкурка, пасты, надфиль и т.п.)
АМ	Отчисление на амортизацию оборудования
В	Вода техническая
ВРУ	Стоимость одного часа работы установки для модификации поверхности
ДМ	Вспомогательные материалы для обтирки поверхности и т.п.
Е	Затраты электроэнергии
М	Черные металлы (стали, чугуны)
МЗ	Материалы для сварочных работ (электроды, сварочный провод, углекислота)
МЗ	Моющие средства (порошки и пасты моющие)
МК	Металлы цветные (медные, алюминиевые, титановые сплавы)
МП	Материалы полимерные или керамические
ОК	Отдельная калькуляция или расчет стоимости
ПД	Работа исследователя
ПК	Работа конструктора
ПКР	Работа квалифицированного рабочего
ПР	Работа рабочего
Р	Растворитель органического происхождения
РО	Органические обезжириватели
РП	Растворитель-преобразователь
РТ	Вещества для травления покрытий, поверхностных слоев
Т	Тепловая энергия для нагревания растворов и воды

Изложенная выше классификация вспомогательных операций и видов затрат позволяет в конкретных условиях производителя работ по модификации металлических деталей с помощью ВДГРТ в полной мере учитывать их стоимость как отдельную составляющую экономических показателей процесса.

## **4.2. Экономические предпосылки внедрения ВДГРТ модификации поверхности**

### **4.2.1. Экономические аспекты структуры оборудования.**

Модификация ВДГРТ состоит из нескольких фаз, причем их перечень зависит как от конструктивных особенностей структуры оборудования, так и от конкретного состояния объектов обработки. Введем следующие обозначения продолжительностей этих фаз:

$t_c$  – цикла обработки;

$t_n$  – подготовки поверхности (промывка, обезжиривание, удаление окислов, зачистка, закрытие локальных исключений, отверстий, мест, которые не нуждаются в обработке, сушка и т.п.);

$t_3$  – загрузки или формирования садки непосредственно в разрядной камере;

$t_\phi$  – формирования садки на позиции вне разрядной камеры;

$t_T$  – герметизации и вакуумирования объема камеры, промывка газовой атмосферы, повторного вакуумирования;

$t_o$  – очистки поверхности катодным распылением, при этом в случае значительных загрязнений, окислений поверхности, которые не удалось удалить в фазе подготовки возможны повторные разгрузка, подготовка, загрузка, вакуумирование и очистка (эти особенности, характерные для объектов, которые долго находились в эксплуатации, необходимо учитывать при калькулировании стоимости обработки);

$t_T$  – выхода процесса на режимный уровень температуры объекта модификации, в том числе, когда по технологии она проводится как многоступенчатая – для отдельных подфаз  $t_{T1}, t_{T2} \dots$ ;

$t_p$  – собственно модификации, в том числе – для отдельных подфаз  $t_{p1}, t_{p2} \dots$ ;

$t_x$  – охлаждения непосредственно в разрядной камере;

$t_e$  – разгрузки разрядной камеры или расформирование садки в ней;

$t_d$  – вспомогательных операций по профилактике разрядных камер (очистка от напыления после процесса, промывка изоляторов и т.п.)

Программа модификации может устанавливаться как массовая (в единицах массы)  $Q_m$ , в том числе по видам объектов  $Q_{m1}, Q_{m2} \dots Q_{mi}$ , как и штучная соответственно  $Q_z, Q_{z1}, Q_{z2} \dots Q_{zi}$ . При массе объектов модификации соответственно  $m, m_1, m_2 \dots m_i$ ; между

Глава 4. Организационно-экономические предпосылки внедрения БАТР  
указанными программами существует зависимость

$$Q_m = \sum_1^i m_i Q_{zi} \cdot \quad (1)$$

Фонд рабочего времени оборудования

$$T_\phi = T_K - T_P = z_p K_3 T_3 - T_P, \quad (2)$$

где  $T_K$  – календарный фонд времени работы оборудования,

$T_P$  – продолжительность регламентных работ за период календарного срока (испытание, тарирование систем контроля и управления, планово-профилактические работы, текущий ремонт и т.п.),

$z$  – количество дней работы за календарный период,

$K_3$  – коэффициент сменности,

$T_3$  – продолжительность смены.

Поскольку в одной садке могут загружаться объекты разных типов (этот вопрос решается на основе совместимости технологических режимов, в том числе – режима выхода на нужную рабочую температуру), масса садки при количестве объектов в садке всего и по типам  $Z_c, Z_{c1}, Z_{c2}, \dots, Z_{ci}$

$$m_c = \sum_1^i m_i z_{ci} \cdot \quad (3)$$

Величина садки устанавливается из условий:

а) грузоподъемности подвески

$$m_c = A_n [p_n], \quad (4)$$

где  $A_n$  – площадь контакта изолятора подвески,

$[p_n]$  – допустимое давление при рабочей температуре для материала изолятора;

б) активной площади объектов модификации и энергетической способности источника питания

$$z_c = i_H / A_v j_H, \quad (5)$$

где  $i_H$  – номинальный ток разряда, который обеспечивает источник питания,

$j$  – номинальная плотность тока электрического разряда в газе,

$A_v$  – приведенная активная площадь,

$$A_v = A_H - \sum A_\lambda + \sum K_{кп} A_\lambda, \quad (6)$$

где  $A_H$  – номинальная активная площадь объекта,

$A_\lambda$  – площадь локальных исключений на активной поверхности,

$K_{кп}$  – коэффициент концентрации поля на локальных исключениях, если в садку входят разные объекты, то приведенная активная площадь определяется как средневзвешенная

$$A_v = \sum_1^i A_{vi} z_{ci} / \sum_1^i z_{ci}; \quad (7)$$

в) габаритных размеров

$$z_c = V_K / \sum_1^i z_{ci} \cdot V_{oi}, \quad (8)$$

где  $V_K$  – объем внутреннего рабочего пространства камеры,  
 $V_o$  – объем установочного пространства одного объекта, причем полученное значение  $z_c$  проверяется из условия кратности соотношения внутренних размеров рабочего пространства разрядной камеры к габаритным размерам объектов модификации

$$z_c = INT_{\min} \left( \frac{\pi D_0^2}{4 A_D} \right) \cdot INT_{\min} \left( \frac{L_0}{l} \right), \quad (9)$$

где  $D_0$  – диаметр активной зоны камеры,  $D_0 = D - 2\Delta_D$ , ( $D$  – внутренний номинальный размер камеры,  $\Delta_D$  – радиальный зазор между объектами и анодом),

$L_0$  – длина активной зоны камеры,  $L_0 = L - L_n - \Delta_L$ , ( $L$  – номинальная длина камеры,  $L_n$  – длина подвески или высота подиума,  $\Delta_L$  – сумма дистанций между объектом и анодом и между объектами в осевом направлении),

$A_D$  – площадь проекции установочного пространства объекта на плоскость, перпендикулярную оси камеры,  $A_D = 0,25 \cdot \pi D_z^2$ ,  $D_z$  – условный габаритный размер установочного пространства объекта модификации в радиальном измерении,  $D_z = d_0 + \Delta_z$ ,  $d_0$  – габаритный размер объекта в радиальном направлении,  $\Delta_z$  – дистанция между объектами, которая определяется из условий недопущения разряда с полым катодом, локального перегрева объектов, неравномерности показателей результатов модификации и т.п.,

$INT_{\min}$  – приведение результатов вычислений выражения в скобках к ближайшему меньшему целому;

г) возможности группирования объектов модификации, это условие используется при короткой продолжительности периода между модификациями, например – при модификации режущего инструмента постоянного производственного использования, в этом случае штучная программа  $Q_{ci}$  и количество объектов в садке  $z_{ci}$  устанавливаются в пределах периода между модификациями, группирование объектов модификации проводится с учетом требований технологических режимов относительно совместимости одновременной модификации по размерам, материалу, назначению, скорости вывода на режимные параметры и т.п..

Программа модификации однотипных объектов, которая

Глава 4. Организационно-экономические предпосылки внедрения БАТР  
 измеряется в количестве садов,

$$Q_c = Q_z / z_c = Q_m / m_c, \quad (10)$$

при модификации разнотипных объектов

$$Q_c = \sum_1^i (Q_{zi} / z_{ci}) = \sum_1^i Q_{ci}. \quad (11)$$

Дальше структурная схема оборудования формируется в следующем порядке. Определяется количество стендов модификации - отдельных позиций в оборудовании, на которых в данное время проводится собственно процесс модификации (в него входят фазы, которые перечислены ниже при определении продолжительности цикла в зависимости от типа установок)

$$z_M = T_\phi / t_{cv} Q_c, \quad (12)$$

где  $t_{cv}$  – приведенная продолжительность цикла модификации

$$t_{cv} = \frac{\sum_1^i \frac{Q_{zi}}{z_{ci}} \cdot t_{ci}}{Q_c} = \frac{\sum_1^i Q_{ci} t_{ci}}{Q_c}. \quad (13)$$

Продолжительность цикла модификации определяется в зависимости от типа конструктивных схем установок, которые в общем случае могут быть простыми однокамерными (в них проводятся практически все фазы процесса), или сложными: многопозиционными (несколько позиций обслуживаются последовательно одной, редко - двумя переставными камерами) и многокамерными (отдельные камеры последовательно обслуживаются через коммутаторы общими системами питания, управление, вакуума, газа и т.п.). Поэтому продолжительность цикла для однокамерных установок

$$t_{co} = t_z + t_\Gamma + t_o + t_T + t_p + t_x + t_e + t_d, \quad (14)$$

для многопозиционных

$$t_{cn} = t_\Gamma + t_o + t_T + t_p + t_x + t_d, \quad (15)$$

для многокамерных

$$t_{ck} = t_\Gamma + t_o + t_T + t_p. \quad (16)$$

В случае, когда количество стендов модификации  $z_M \leq 1$  выбирается простая однокамерная схема установки, причем при  $z_M \ll 1$  возможна оптимизация размеров камеры и энергетической способности оборудования, но новые размеры должны допускать установку самого большого объекта модификации из текущей и перспективной номенклатуры. Если же  $z_M > 1$ , то структурная схема установки может быть одной из сложных – многопозиционной или многокамерной. Для

*И. М. Пастух Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде*  
 многопозиционных установок количество позиций, которые обслуживают один стенд, выбирается из условия обеспечения непрерывной работы стендов, т.е. за время, равное продолжительности цикла должны быть выполнены все другие фазы, не вошедшие в цикл. Количество позиций, таким образом

$$z_n = (t_\phi + t_\theta) / t_{cn} \cdot \quad (17)$$

Полученное значение приводится к ближайшему большему целому. Когда количество позиций  $z_n < 0,5$ , то возможна структурная схема с одной позицией на несколько камер, например при расчетном значении количества позиций  $z_n = 0,3$  одна дополнительная позиция обслуживается поочередно тремя камерами (если их в цеху несколько).

Аналогично для многокамерных определяется количество камер, которое тоже приводится к ближайшему большему целому значению

$$z_K = (t_z + t_x + t_\theta + t_\delta) / t_{ck} \cdot \quad (18)$$

Если количество камер превышает четыре (оптимально – не больше трех), то количество стендов увеличивается на величину  $z_{M0}$  (реально – последовательно добавляется по одному стенду к значению, определенному по формуле (12)). Тогда количество камер

$$z_k = (t_z + t_x + t_\theta + t_\delta) / \frac{z_{M0} + z_M}{z_M} \cdot t_{ck} \cdot \quad (19)$$

Окончательный выбор типа конструкции сложной установки ведется путем сопоставления коэффициентов относительной стоимости

$$K_B = B_y / B_\theta = K_K K_V K_P \cdot \quad (20)$$

где  $B_y$  и  $B_\theta$  – стоимости соответственно установки, которая проектируется, и базовой,

$K_K$ ,  $K_V$ ,  $K_P$  – составляющие коэффициента стоимости, которые учитывают влияние на стоимость установки количества камер, их объема и мощности источника питания.

Введение именно интегрального показателя относительной стоимости вместо сопоставления абсолютных значений стоимости, которые могут в значительной мере колебаться в зависимости от конъюнктуры цен на комплектацию, разрешает исключить последний фактор, поскольку стоимости всех конфигураций установок рассчитываются по однотипной укрупненной методике. Некоторые результаты в аспекте соотношений главных составляющих стоимости установок разных типов приведены в табл. 4.3 (норма прибыли составляет для всех вариантов - 23.1%).

Выбор конструктивной схемы установки в качестве базовой принципиальной роли не играет, поэтому этот вопрос решался, исходя из наиболее распространенной типичной схемы и ее основных показателей. В качестве таковой принята однокамерная установка блочной конструкции (допускает дальнейшую модернизацию путем наращивания количества камер) с размерами камеры 1000 x 1200 мм (диаметр на длину) и мощностью трансформатора 63 кВт. Окончательно преимущество отдается той конструктивной схеме, для которой меньше значение коэффициента относительной стоимости. Значение коэффициентов стоимости можно принимать для многопозиционных - по рис. 4.1, для многокамерных - по рис. 4.2, при промежуточных значениях параметров камер - коэффициент выбирается интерполяцией.

#### 4.2.2. Концепция профилактического обслуживания.

Термин работы объекта эксплуатации можно разделить на три фазы (рис. 4.3): период приработки с ресурсом  $l_n$ , при этом фактор работоспособности  $\Delta$ , которым может быть изнашивание, усталостное разрушение, превышение показателями характера соотношений критических границ и т.п. используется на величину  $\Delta_n$ , установившейся работы (ресурс  $l_y$ ) и форсированного исчерпания фактора работоспособности в зоне ресурса  $l_{\phi}$ . Суть концепции заключается в том, что после некоторого ресурса использования объекта, когда процесс исчерпания фактора работоспособности еще не приобрел форсированного характера, он подлежит профилактической модификации. Графическая интерпретация процесса эксплуатации объекта с профилактической модификацией показана на рис. 4.4. Для упрощения картины криволинейные зависимости аппроксимированы прямыми, причем тангенс угла их наклона равняется скорости исчерпания фактора работоспособности  $d\Delta/dl$ , устанавливаемой экспериментально.

При стоимости нового объекта  $B_0$  стоимость модификации одного объекта  $e_M$  определяется как

$$e_M = t_c B_n / z_c, \quad (21)$$

где  $B_n$  – стоимость работы установки на протяжении единицы времени.

Ориентировочные значения стоимости работы установок на протяжении одного часа при 20% прибыли на данный момент в условиях исследовательского производства представляют без налога на добавленную стоимость при полной установленной мощности  $P=165$  кВт 35,66 грн., при  $P=67$  кВт – 22,04 грн. Соотношение отдельных статей расходов демонстрируются табл. 4.4.

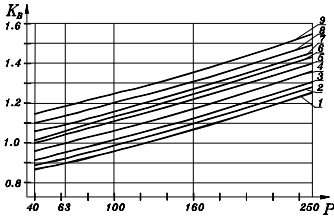


Рис. 4.1. Коэффициенты относительной стоимости для многопозиционных установок  
1,2,3- камера 800x600 мм, 2,5,6- 1000x1200 мм, 7,8,9- 1000x2000 мм, 1,4,7 – одна позиция, 2,5,8 – две позиции, 3,6,9 три позиции

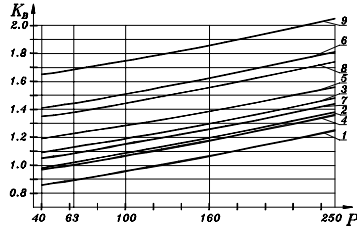


Рис. 4.2. Коэффициенты относительной стоимости для многокамерных установок  
1,2,3- камера 800x600 мм, 2,5,6- 1000x1200 мм, 7,8,9- 1000x2000 мм, 1,4,7 – одна камера, 2,5,8 – две камеры, 3,6,9 три камеры

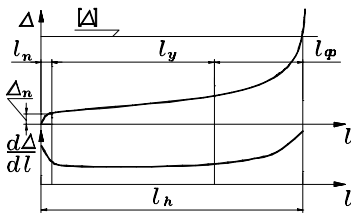


Рис. 4.3. Схема периодов срока работы объектов

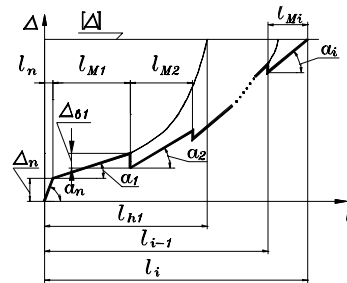


Рис. 4.4. Схема эксплуатации объекта с профилактической модификацией

Условие целесообразности каждой следующей модификации заключается в том, что стоимостный эквивалент увеличения ресурса должен превышать все дополнительные расходы, в том числе, если модификация выполняется в региональном сервисном центре, то и расходы на транспортно-экспедиционные операции.

В этом случае модификация будет целесообразной при

$$\frac{l_i}{l_{i-1} + (1 - K_M)l_{h(i-1)}} \cdot B_\delta > (\epsilon_M + \epsilon_T), \quad (22)$$

где  $l_i$ ,  $l_{i-1}$  - предполагаемый после следующей и текущий после предыдущей модификации ресурсы работы объекта,

$l_{h(i-1)}$  – ресурс работы объекта в предыдущий период между модификациями без последующей модификации,

$K_M$  – коэффициент сокращения периода между модификациями



Глава 4. Организационно-экономические предпосылки внедрения БАТР работы объекта,  $K_M = l_M / l_h$ ,  $l$  и  $l_h$  – продолжительность установившейся работы в пределах периода между модификациями и продолжительность работы в данном периоде к полному исчерпанию фактора работоспособности.

Таблица 4.3

**Соотношение отдельных статей стоимости установок (в процентах от стоимости всей установки)**

Статья	Многопозиционные установки											
	Количество позиций											
	Одна				Две				Три			
	Размеры камеры, мм				Размеры камеры, мм				Размеры камеры, мм			
	800 x 600		1000x2000		800 x 600		1000x2000		800 x 600		1000x2000	
	P, кВт		P, кВт		P, кВт		P, кВт		P, кВт		P, кВт	
	40	250	40	250	40	250	40	250	40	250	40	250
Комплектующие материалы	57,7	63,7	61,2	65,4	58,2	63,9	61,8	65,8	58,7	64,2	62,4	66,1
в т.ч. камера	5,7	3,9	16,6	11,4	5,5	3,8	16,1	11,1	5,4	3,8	15,7	10,9
в т.ч. трансформатор	18,8	30,1	15,4	26,2	18,3	29,6	14,8	25,4	17,8	29,0	14,2	24,6
Зароботная плата с начис.	13,2	9,0	10,8	7,9	12,8	8,85	10,3	7,6	12,4	8,7	9,92	7,4
Другие расходы	6,1	4,2	4,98	3,6	5,9	4,1	4,8	3,5	5,7	4,0	4,6	3,4
Статья	Многокамерные установки											
	Количество камер											
	Одна				Две				Три			
	Размеры камеры, мм				Размеры камеры, мм				Размеры камеры, мм			
	800 x 600		1000x2000		800 x 600		1000x2000		800 x 600		1000x2000	
	P, кВт		P, кВт		P, кВт		P, кВт		P, кВт		P, кВт	
	40	250	40	250	40	250	40	250	40	250	40	250
Комплектующие материалы	57,7	63,7	61,1	65,4	59,9	64,8	64,6	67,4	61,7	65,8	66,9	68,8
в т.ч. камеры	7,3	4,99	15,7	11,4	12,8	9,1	24,4	18,9	17,2	12,7	30,0	24,2
в т.ч. трансформатор	18,8	30,1	15,5	26,3	16,6	27,6	12,0	21,8	14,9	25,5	9,9	18,6
Зароботная плата с начис.	13,2	9,02	10,8	7,9	11,6	8,3	8,4	6,5	10,4	7,6	6,9	5,6
Другие расходы	6,1	4,2	5,0	3,6	5,4	3,8	3,9	3,0	4,8	3,5	3,2	2,6

Очевидно, что в случае, когда профилактическая модификация выполняется на собственном оборудовании, то расходы на транспортно-экспедиционные операции в уравнение (22) не включаются.

В общем виде фактор работоспособности исчерпан при

$$[\Delta] = \Delta_n + \sum_1^i (l_{M,i} tg \alpha_i - \Delta_{ei}), \quad (23)$$

где  $tg \alpha$  - скорость исчерпания фактора работоспособности,

$\Delta_a$  – прирост фактора работоспособности после модификации.

Таблица 4.4

**Ориентировочные соотношения статей стоимости одного часа работы установок, в процентах от полной стоимости**

Статья расходов	P=165 кВА	P=67 кВА
Электрэнергия	30,98	24,32
Зарплата с начислениями.	17,38	21,12
Газ	0,7	0,65
Вода	1,22	1,23
Накладные расходы	13,87	13,88
Другие статьи	35,85	38,8

**4.2.3. Концепция региональных сервисных центров модификации.**

В тех случаях, когда программа модификации незначительна целесообразно организовать сеть региональных сервисных центров. При этом не только обеспечивается рациональная загрузка оборудования, но и повышается качество, поскольку в пределах больших специализированных предприятий создаются лучшие условия для подготовки высококлассных специалистов, соблюдения технологической дисциплины, усовершенствования технической политики и т.п.. При количестве садов в транспортной партии  $Q_{cm}$ , которая устанавливается из условия компромисса между фондом объектов на производстве (для объектов, используемых непосредственно на данном производстве) или расходами в связи с увеличением продолжительности технологического цикла (для основной продукции данного производства) и стоимостью транспортно-экспедиционных операций, условие целесообразности организации собственного центра модификации

$$\frac{Q_c}{Q_{cm}} B_T + Q_c t_{cv} B_h > K_a B_y, \quad (24)$$

где  $K_a$  – амортизационный коэффициент.

Местоположение регионального сервисного центра устанавливается на основе минимизации транспортной задачи, т.е. минимума суммы  $Q_{ci} B_T / Q_{cmi}$  по всем потенциальным пользователям услуг регионального сервисного центра .

**ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК**

1. Пастух І. М. Організаційно-економічні передумови впровадження газорозрядних вакуумно-дифузійних технологій модифікації поверхні металів. – Хмельницький: Вісник ТУП;- 2001;- №6; С. 126-133.

*Для заметок*

*Для заметок*

*Для заметок*

*И. М. Пастух*

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА БЕЗВОДОРОДНОГО  
АЗОТИРОВАНИЯ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ**

г. Харьков, ННЦ ХФТИ, 2006 г.

*Утверждено к печати Ученым советом Института физики  
твердого тела, материаловедения и технологий Национального  
научного центра «Харьковский физико-технический институт»*

**Составители:**

*Ответственный за выпуск: Никишина Т. Р.*

Подписано в печать 25.04.2006  
Формат 60×84/16 Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 22  
Тираж 500 экз. Заказ № 0421-01

Отпечатано в типографии  
ООО «ИПП Контраст»  
Украина, 61166, г. Харьков, пр. Ленина, 40  
тел. (057) -717-76-51, 719-49-13  
Свидетельство: ДК №1778 от 05.05.2004