

В.С. ЧЕРЕДНИЧЕНКО, А.С. АНЬШАКОВ,  
М.Г. КУЗЬМИН

# ПЛАЗМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

*Допущено УМО по образованию в области энергетики и электротехники  
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальности 140605 «Электротехнологические установки  
и системы», направления подготовки 140600 «Электротехника,  
электромеханика и электротехнологии»*

НОВОСИБИРСК  
2011

УДК 621.365(075.8)  
Ч-462

*Под редакцией доктора технических наук,  
профессора В.С. Чередниченко*

Рецензенты: чл.-корр. РАН *М.Р. Предтеченский* (ИТ СО РАН),  
д-р техн. наук, проф. *А.Б. Кувалдин* (МЭИ)

**Чередниченко В.С.**  
Ч-462 Плазменные электротехнологические установки : учебник для вузов /  
В.С. Чередниченко, А.С. Анышаков, М.Г. Кузьмин ; под ред. В.С. Чередни-  
ченко. – 3-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 602 с. : ил. –  
(Серия «Учебники НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-1576-4

Изложены физические основы преобразования электрической энергии в энергию плазмы на основании современных представлений о взаимодействиях плазмы с электромагнитным полем; рассмотрены электрические цепи, включающие дуговые разряды постоянного и переменного тока, излагаются основы электродинамики плазмы с введением понятий частотной и пространственной дисперсии; анализируются характеристики электродуговых плазмотронов различных конструкций и плазменных электротехнологий, осуществляемых в современном промышленном оборудовании. Книга предназначена для подготовки кадров по направлению «Электротехника, электромеханика, электротехнологии», специальности «Электротехнологические установки и системы» и может быть полезна студентам, магистрантам, аспирантам и специалистам, занимающимся плазменными технологиями.

УДК 621.365(075.8)

ISBN 978-5-7782-1576-4

© Чередниченко В.С., Анышаков А.С.,  
Кузьмин М.Г., 2008, 2011  
© Новосибирский государственный  
технический университет, 2008, 2011

## ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

При подготовке второго издания учебника авторы постарались, с одной стороны, изложить научный и информационный материал в соответствии с программными документами подготовки студентов, магистрантов и аспирантов, а с другой стороны – помочь читателю приобрести достаточные знания и навыки для дальнейшего совершенствования и развития плазменных технологий и оборудования.

Это определило цель учебника – изложить основы плазменных физических процессов, на основе которых возможно понимание принципов работы плазменного промышленного оборудования.

В последние годы российское образовательное сообщество высших учебных заведений развивается под знаком Болонского процесса, одним из ключевых положений которого является ориентация вузов на конечный результат – глубокие знания молодых специалистов, базирующиеся на общности фундаментальных принципов функционирования национальных образовательных систем Европы и России с целью создания единого научно-образовательного пространства.

В связи с реализацией в вузах страны системы новых образовательных стандартов, лицензирования и аккредитации направлений подготовки бакалавров, специалистов и магистрантов, развитием самостоятельной работы студентов одной из актуальных задач учебного процесса в высшей школе является подготовка и издание учебников и учебных пособий, которые по содержанию и объему в большей мере соответствовали бы сочетанию модульной технологии с зачетными образовательными баллами, дистанционными формами обучения.

В построении предлагаемого учебника заложена возможность структурирования изучения плазменных электротехнологических установок с разде-

лением фундаментальных вопросов электрофизики и теплофизики, лежащих в основе плазменной техники, инженерной части оборудования и реализованных в промышленности плазменных электротехнологий.

Изучение любой технической дисциплины традиционно начинается с определения ее предметной области, с характеристик конструктивных решений и направлений их развития, исторических сведений. Эта задача решается во введении. Затем идут четыре части, разбитые на отдельные главы. Первая часть знакомит читателя с физическими основами газовых разрядов, которые используются для получения низкотемпературной плазмы. Вторая часть посвящена рассмотрению электрических цепей с газовыми разрядами и, прежде всего, с дуговыми разрядами – как наиболее широко используемыми в промышленности. В третьей части учебника рассматриваются промышленные генераторы низкотемпературной плазмы (плазмотроны), на основе которых создаются электротехнологические установки атмосферного и пониженного давления, плазменные технологические реакторы, высокочастотные, сверхвысокочастотные плазмотроны и плазменные генераторы трансформаторного типа. Рассмотренные конструкции плазмотронов создавались с использованием изложенных фундаментальных положений теории в первой и второй частях учебника, в том числе теории подобия плазменных процессов. Это позволило обобщить экспериментальные результаты исследований и создать инженерные методы расчетов плазмотронов различных конструкций. Завершая учебник, четвертая часть знакомит читателя с плазменными электротехнологиями и оборудованием для их проведения. Эта часть учебника во втором издании значительно расширена за счет включения самостоятельной главы по плазменным установкам для плавки и восстановлению металлов.

Эффективность и эксплуатационная надежность технологического оборудования непосредственным образом зависят от принятых проектных решений. Плазменная техника не составляет в этом смысле исключения. Обоснованный выбор и взаимное согласование источников питания, плазмотронов, параметров электропечей и реакторов создают необходимую предпосылку для оптимального конструирования и эксплуатации плазменных электротехнологических установок.

Значительный вклад в создание методов расчета и проектирования плазменного оборудования внесен отечественными учеными. Благодаря этим работам сегодня можно уже с достаточным основанием говорить о становлении новой инженерной дисциплины – теоретических основ проектирования промышленных установок, использующих в качестве технологической среды низкотемпературную плазму. Эта дисциплина основывается на фундаментальных

положениях электродинамики и теплофизики и обобщает результаты новейших разработок, имеющих оптимальные схемы и характеристики плазменных электротехнологических установок.

Второе издание книги, как и первое, ориентировано на студентов, магистрантов и аспирантов вузов технического профиля и инженерный состав фирм и предприятий, занимающихся созданием и эксплуатацией плазменных электротехнологических установок и систем. Учебник соответствует стандартам программы специальности 140605 «Электротехнологические установки и системы», направлению подготовки 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам первого и второго изданий учебника – доктору технических наук, профессору А.С. Васильеву (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет – ЛЭТИ), члену-корреспонденту РАН М.Р. Предтеченскому (Институт теплофизики СО РАН) и доктору технических наук, профессору А.Б. Кувалдину (Московский энергетический институт) за деловое обсуждение, советы и рекомендации при подготовке этого издания. Авторы благодарны также многим специалистам, которые использовали первое издание учебника при работе с магистрантами и аспирантами и высказали свои пожелания по его улучшению и дополнению.

Авторы с признательностью примут критические замечания, пожелания и предложения читателей.

*Авторы*

## ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Развитие современной техники требует широкого внедрения в промышленность новых эффективных технологических процессов, основанных на достижениях современной науки и техники. Одно из направлений, существенно расширяющих технологические возможности процессов обработки материалов, – применение концентрированных потоков энергии, которые получают с использованием генераторов низкотемпературной плазмы (плазмотронов). Плазменные электротехнологические установки сформировали приоритетное направление развития электротехнологической техники.

В сложившихся условиях использование плазменных процессов и расширение областей их применения сдерживаются не только отсутствием завершенной общей теории плазменных процессов, но и подготовкой инженерных и научных кадров по этому направлению. Отделение «Электротехнологии» Академии электротехнических наук РФ поставило перед ведущими в этой области специалистами России задачу создания первого учебника по плазменным электротехнологическим установкам. Эта задача получила поддержку учебно-методического объединения по образованию в области энергетики и электротехники Министерства образования и науки РФ.

Предлагаемая книга по плазменным электротехнологическим установкам является первым фундаментальным учебником по этому направлению развития плазменной электротехнологической техники. Она написана на основе курса лекций, сформированных в сибирской научной школе электротехнологов и читаемых авторами в течение двадцати лет студентам, магистрантам, аспирантам и научным стажерам в Новосибирском государственном техническом университете, Институте теплофизики СО РАН и ОАО «Сибэлектро-

терм» (Новосибирск), являющемся базовым заводом России по изготовлению крупного электротермического оборудования (в том числе плазменных электропечей и установок) и использованию плазменных электротехнологий (резки и сварки) при производстве электропечей различного назначения.

Отставание развития фундаментальной общей теории плазменных процессов в сильноточных газовых разрядах имеет объективные причины, в основе которых лежат сложные взаимосвязи электродинамических, теплофизических и газодинамических процессов, развивающихся в газовых разрядах. Очевидное отставание в развитии электродинамики плазмы от развития плазменной техники в определенной мере связано с тем, что электромагнитная теория Максвелла в своей первоначальной форме была феноменологической и не учитывала зависимостей диэлектрической и магнитной проницаемостей материальных сред от частоты электромагнитной энергии. Она не ставила задачи теоретического определения или объяснения процессов изменения диэлектрических и магнитных свойств конкретных сред как во времени, так и в пространстве. Поэтому в электротехнике газовый электропроводящий промежуток разрядов рассматривался как нелинейный участок электрической цепи, аналогичный металлическому проводнику. Такое упрощенное представление о газовом разряде позволяло теоретически достоверно представить электро- и теплофизические характеристики плазменного проводника только при проведении экспериментальных исследований.

Поэтому развитие плазменной техники базировалось на массиве экспериментальных результатов, который анализировался и обобщался на основе высокотемпературной газодинамики и теплофизики в пределах удельных мощностей электрической и тепловой энергии, достигаемых по мере развития плазменной техники.

Экспериментально обнаруженная зависимость показателя преломления, диэлектрической и магнитной проницаемостей плазмы от частоты (частотная дисперсия) длительное время считалась явлением, противоречащим теории. В настоящее время доказано, что зависимость диэлектрической и магнитной проницаемостей вещества от частоты электромагнитной волны не только не противоречит теории электромагнитного поля, но и позволяет на основе существующих представлений судить о конкретных свойствах материальных сред с учетом предшествующих событий с использованием теории частотной и волновой (пространственной) дисперсии.

Изучение и развитие кинетических представлений о плазме показали, что в определенных условиях пространственная дисперсия диэлектрической и магнитной проницаемостей оказывается достаточно большой. Пространственная дисперсия вошла в электродинамику на таких же правах, как и частотная дисперсия. Особенно значимо эти процессы влияния проявляются в переходных режимах, когда скорость протекания релаксационных процессов (намагниченность, ионизация и рекомбинация, температура и др.) рассогласовываются с электродинамическими внешними параметрами электромагнитного поля. Учет этих взаимосвязей позволил осуществить более глубокие исследования электродинамических процессов в плазме.

В учебнике изложены физические основы преобразования электрической энергии в энергию плазмы с использованием современных представлений о протекающих процессах. Эти разделы дают основу для понимания с единой точки зрения теоретических и экспериментальных характеристик плазменных установок. В последующем рассматриваются электрические цепи, включающие дуговые разряды постоянного и переменного токов, в том числе излагаются основы электродинамики плазмы с введением понятий частотной и пространственной дисперсии, приведено описание генераторов низкотемпературной термической плазмы и плазменных электротехнологий, осуществляемых в современном промышленном оборудовании.

***А.С. Васильев,***

доктор технических наук, профессор,  
Заслуженный деятель науки и техники РФ,  
академик-секретарь Академии  
электротехнических наук РФ



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию.....	5
Предисловие к первому изданию.....	7
Введение.....	11
<i>Часть первая. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА</i> .....	23
<b>Г л а в а I. Элементарные процессы в газовом разряде</b> .....	23
§ 1. Взаимодействие зарядов с электрическим полем газового разряда .....	24
1.1. Квазинейтральность и плазменная частота.....	24
1.2. Электростатическое взаимодействие зарядов.....	28
1.3. Перенос зарядов в газовых разрядах .....	31
1.4. Электрическое поле в газовом промежутке.....	36
1.5. Преобразование электрической энергии в тепловую в газовом разряде .....	39
§ 2. Разряды в постоянном электрическом поле .....	48
2.1. Основные понятия физики атомных столкновений .....	53
2.2. Потери импульса и энергии электронов .....	56
2.3. Экранирование зарядов в плазме .....	59
§ 3. Элементарные процессы в газовом разряде .....	62
3.1. Возбуждение, ионизация и рекомбинация .....	62
3.2. Подвижность и диффузия заряженных частиц .....	77
§ 4. Элементарные процессы на граничных поверхностях .....	87
4.1. Электроны проводимости в металле .....	87
4.2. Термоэлектронная эмиссия .....	93
4.3. Холодная (автоэлектронная, или полевая) эмиссия .....	98
4.4. Термоавтоэлектронная эмиссия .....	101
4.5. Фотоэлектронная эмиссия .....	101
4.6. Вторичная электронная эмиссия .....	103
4.7. Электронные явления на аноде .....	104
4.8. Нейтрализация и аккомодация ионов .....	105

§ 5. Общие свойства газоразрядной плазмы .....	108
5.1. Электропроводность .....	108
5.2. Теплопроводность .....	109
5.3. Вязкость .....	112
5.4. Джоулево тепло .....	112
5.5. Термическое равновесие .....	113
5.6. Квазинейтральность плазмы .....	116
<b>Г л а в а II. Виды электрических разрядов в газе .....</b>	<b>119</b>
§ 1. Несамостоятельный разряд .....	119
§ 2. Пробой и зажигание самостоятельного разряда .....	122
§ 3. Закон Пашена .....	125
§ 4. Пробой в неоднородном поле .....	129
§ 5. Стримерная теория искрового разряда .....	130
§ 6. Искровой разряд .....	133
§ 7. Коронный разряд .....	133
§ 8. Тлеющий разряд .....	134
8.1. Картина свечения.....	135
8.2. Распределение напряженности электрического поля в столбе тлеющего разряда.....	137
8.3. Область катодного падения потенциала.....	140
8.4. Положительный столб .....	142
8.5. Анодный слой .....	149
<b>Г л а в а III. Дуговой разряд .....</b>	<b>150</b>
§ 1. Структура и свойства дугового разряда .....	151
§ 2. Виды дуговых разрядов .....	154
§ 3. Прикатодная область (катодный слой) .....	156
§ 4. Баланс энергии на катоде .....	158
§ 5. Анодная область. Баланс энергии на аноде .....	171
§ 6. Положительный столб дугового разряда.....	174
<i>Часть вторая. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ДУГАМИ .....</i>	<i>190</i>
<b>Г л а в а IV. Устойчивость системы источник питания–дуга .....</b>	<b>190</b>
§ 1. Вольт-амперная характеристика дуги .....	190
§ 2. Расчет областей устойчивости на основе статической вольт-ампер- ной характеристики дуги .....	192
§ 3. Динамические вольт-амперные характеристики дуги постоянного тока .....	199
§ 4. Расчет областей устойчивости на основе динамической вольт-ампер- ной характеристики дуги .....	200

§ 5. Выход дуги на рабочий режим .....	202
§ 6. Зажигание дуги постоянного тока .....	204
<b>Г л а в а V. Дуговой разряд переменного тока .....</b>	<b>206</b>
§ 1. Электродинамика плазмы электрического разряда .....	206
§ 2. Основные положения электродинамики плазмы дуговых разрядов .....	211
§ 3. Особенности электрических характеристик дугового разряда переменного тока .....	231
§ 4. Процессы в дуге переменного тока за полупериод питающего напряжения .....	236
§ 5. Анализ однофазной цепи переменного тока с дугой.....	239
<i>Часть третья. ГЕНЕРАТОРЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ.....</i>	<i>244</i>
<b>Г л а в а VI. Электродуговые плазмотроны .....</b>	<b>245</b>
§ 1. Классификация плазмотронов .....	246
§ 2. Технологические электродуговые плазмотроны .....	247
2.1. Электродуговые нагреватели газа (струйные плазмотроны) .....	247
2.2. Плавильные плазмотроны .....	286
2.3. Плазмотроны для резки металлов .....	292
2.4. Плазмотроны для напыления .....	303
2.5. Плазменные технологические реакторы .....	311
§ 3. Основные физические процессы и характеристики в плазмотронах линейной схемы .....	323
3.1. Структура дуги и потока газа в канале плазмотрона .....	324
3.2. Шунтирование дуги и пульсации параметров разряда .....	328
3.3. Вольт-амперные характеристики дуги .....	331
3.4. Критерии подобия и обобщение вольт-амперных характеристик дуги .....	334
3.5. Напряженность электрического поля дуги .....	344
3.6. Теплообмен в электродуговой камере и тепловой коэффициент полезного действия плазмотрона .....	353
3.7. Приэлектродные процессы и эрозия электродов.....	362
<b>Г л а в а VII. Высокочастотные плазмотроны .....</b>	<b>384</b>
§ 1. Классификация плазмотронов.....	384
§ 2. Высокочастотные факельные плазмотроны.....	387
§ 3. Высокочастотные индукционные плазмотроны .....	388
3.1. Конструкции высокочастотных индукционных плазмотронов .....	389
3.2. Электрические параметры высокочастотных индукционных плазмотронов.....	392

3.3. Энергетика и коэффициент полезного действия высокочастотных генераторов и высокочастотных индукционных плазмотронов .....	394
3.4. Температура плазмы в высокочастотном индукционном плазмотроне.....	397
§ 4. Высокочастотные емкостные плазмотроны .....	399
4.1. Конструкции высокочастотных емкостных плазмотронов .....	400
4.2. Энергетические характеристики высокочастотных емкостных плазмотронов.....	404
4.3. К теории высокочастотного емкостного разряда .....	408
§ 5. Сверхвысокочастотные плазмотроны .....	413
5.1. Сверхвысокочастотные разряды .....	413
5.2. Конструктивные схемы сверхвысокочастотных плазмотронов.....	416
5.3. Эквивалентные схемы сверхвысокочастотных плазмотронов.....	420
§ 6. Трансформаторный плазмотрон .....	423
6.1. Общие положения.....	423
6.2. Электрические и оптические характеристики .....	426
<i>Часть четвертая. ПЛАЗМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ.....</i>	<i>429</i>
<b>Г л а в а VIII. Электротехнология переработки муниципальных и промышленных отходов.....</b>	<b>430</b>
§ 1. Сравнительный анализ технологий.....	432
§ 2. Расчет, эксперимент и испытания .....	435
§ 3. Эколого-экономические предпосылки для реализации .....	443
§ 4. Промышленные плазменные электропечи для уничтожения токсичных отходов.....	445
<b>Г л а в а IX. Плазменное воспламенение пылеугольных потоков .....</b>	<b>456</b>
§ 1. Термохимическая подготовка топлива к сжиганию .....	457
§ 2. Некоторые результаты опытно-промышленных испытаний.....	461
§ 3. Системы плазменного воспламенения угля .....	466
3.1. Электродуговые плазмотроны .....	467
§ 4. Системы электропитания плазмотронов .....	471
<b>Г л а в а X. Плазменное напыление порошковых материалов.....</b>	<b>472</b>
§ 1. Движение и нагрев частиц в плазменной струе.....	474
§ 2. Уравнение нагрева частиц в потоке плазмы .....	478
§ 3. Создание низкотемпературного электронагревателя методом плазменного напыления .....	481
<b>Г л а в а XI. Плазменная сварка тонкостенных листов металла .....</b>	<b>490</b>
§ 1. Физические основы плазменной сварки.....	490
§ 2. Плазмотроны для сварки на прямой и обратной полярности.....	493

§ 3. Исследование вольфрамовых катодов и анодов .....	498
§ 4. Технология изготовления тонкостенных труб.....	503
<b>Г л а в а XII. Плазменная обработка строительных материалов .....</b>	<b>506</b>
§ 1. Плазменная обработка силикатного кирпича .....	507
§ 2. Плазменная обработка глиняного кирпича .....	512
§ 3. Плазменная обработка бетонных изделий .....	513
3.1. Установка плазменной обработки бетонных изделий (экранов балконов зданий).....	515
3.2. Автоматизированная плазменная установка «Гермес-010» для обработки большеразмерных строительных изделий .....	517
3.3. Плазмотрон с электромагнитным перемещением дуги для обработки бетонных изделий .....	519
<b>Г л а в а XIII. Плазменно-импульсное упрочнение деталей машин и механизмов.....</b>	<b>523</b>
§ 1. Физические основы электротехнологии.....	523
§ 2. Нанесение сплошного слоя покрытия .....	527
§ 3. Упрочнение поверхностей деталей в воде .....	528
§ 4. Примеры реализации плазменно-импульсной технологии .....	530
4.1. Упрочнение дисков лушильников .....	530
4.2. Испытание упрочненных сверл с напайкой из ВК-8.....	531
<b>Г л а в а XIV. Плазменные установки для плавки и восстановления металлов .....</b>	<b>532</b>
§ 1. Плазменно-дуговые плавильные электропечи.....	535
§ 2. Плазменно-дуговые установки для восстановления металлов.....	543
§ 3. Переработка металлического лома в литейном производстве .....	575
§ 4. Восстановление алюминия из дроссов в алюминиевой промышленности .....	580
§ 5. Переработка химически активных и тугоплавких металлов .....	581
§ 6. Получение металлов группы платины при переработке использованных катализаторов .....	590
<b>Заключение .....</b>	<b>594</b>
<b>Библиографический список .....</b>	<b>596</b>