

Рецензия на учебно-методическое пособие
**«Электрофизические процессы в газах
 при воздействии сильных электрических полей»**,
 Ю. К. Стишков, А. В. Самусенко, СПб: ВВМ, 2012. 649 с.

Современные учебные материалы по электрофизическим процессам в газах при воздействии сильных электрических полей в основном касаются разреженных газов. Среди известных монографий, посвященных электрофизическим процессам в воздухе, можно выделить учебник для вузов "Электрофизические основы техники высоких напряжений" И.М. Бортника, И.П. Верещагина, Ю.П. Вершинина и др. ("Энергоатомиздат", 1993), а также монографию Ю.П. Райзера "Физика газового разряда", опубликованную в 1992 г. (переиздана в 2009 г.). В последнее время вышло значительное число работ, посвященных физике тлеющего разряда. Подобная тенденция связана, видимо, с тем, что на протяжении многих десятилетий разрядные процессы в разреженных газах были исследованы более глубоко как в теоретическом, так и в экспериментальном плане. Особенно высокий уровень понимания достигнут при анализе тлеющего разряда, разбору теоретических моделей которого была посвящена существенная часть публикаций.

В последние два десятилетия наблюдается значительный прогресс в понимании разрядных процессов в газах при давлении порядка атмосферного. Особенно это касается исследований стримерных процессов, стримерно-лидерного перехода, коронного разряда, электрогазодинамических явлений в газах. Большой объем новых материалов был получен, с одной стороны, благодаря достижениям в технике эксперимента – появлению высокоскоростных цифровых камер с электронным затвором, позволившим увидеть динамику разрядных процессов, разворачивающихся при характерных временах порядка наносекунды. С другой стороны, значительную роль сыграло появление доступных средств компьютерного моделирования разрядных процессов – построены наглядные модели высоконелинейных явлений, позволившие проверить некоторые выдвинутые ранее предположения о механизме стримерных процессов и электрогазодинамических явлений в воздухе. Эти достижения широко обсуждались на конференциях «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», им посвящались статьи в журнале "Электронная обработка материалов". Сопоставление результатов экспериментальных явлений и компьютерного моделирования позволяет сформулировать важные закономерности и получить полезные теоретические модели про-

цессов. Именно такой логики изложения и учета современных достижений в области электрофизики газов и придерживались авторы настоящего учебно-методического пособия.

Следует особо отметить, что в данной области исследования численные методы и компьютерное моделирование зачастую являются единственными действенными методами анализа проблем, поэтому аспекты применения различных численных моделей, а также вопросы постановки задач подробно рассматриваются в пособии.

В отличие от ранее изданных монографий учебно-методическое пособие «Электрофизические процессы в газах при воздействии сильных электрических полей» касается преимущественно разрядных процессов в воздухе при атмосферном давлении. Именно такие условия наиболее интересны с точки зрения практического применения для повышения эффективности и безопасности современных электрофизических и электроэнергетических устройств, которые работают в воздухе.

Пособие состоит из введения и одиннадцати глав, имеющих свои списки литературы.

Данное пособие основано на оригинальных материалах компьютерного моделирования и экспериментального исследования различных электрофизических процессов, происходящих в газах под воздействием высоковольтных электрических полей. В основе этих процессов лежит лавинное размножение заряженных частиц в результате ударной ионизации молекул газа электронами. В работе всесторонне проанализированы процессы распространения лавин в однородных и неоднородных электрических полях, процессы лавинно-стримерного перехода и процессы распространения положительного и отрицательного стримеров в однородном и неоднородном электрическом полях. Подробно исследована физика волны ионизации и процессы замыкания головок стримеров на электроды. Существенное внимание уделено влиянию твердых диэлектрических барьеров на распространение стримеров, а также на процессы стримерно-лидерного перехода.

Особую ценность пособию придает оригинальность основной части материала. Это касается как результатов компьютерного моделирования, которым дан подробный развернутый анализ, так и результатов экспериментальных исследований. Приведено и проанализировано

множество оригинальных фотографий стримерных процессов и коронного разряда в различных условиях.

Актуальность изложенных результатов исследований не вызывает сомнений по следующим причинам.

Такие процессы, как стример, коронный разряд, описываются нелинейными системами уравнений. Поиск упрощенных аналитических решений позволял сделать это лишь в самых общих чертах. Численные расчеты долгое время ограничивались простейшими постановками из-за недостатка расчетных ресурсов. Появившиеся в последние годы средства компьютерного моделирования физических процессов нашли широкое применение в исследованиях разрядных процессов: именно в это время вышло множество работ на эту тему. Компьютерные модели позволили построить описание разрядных процессов разных типов, включая пространственную структуру и взаимосвязи физических явлений, на основе решений достаточно полных задач, а не полуэмпирических, существенно упрощенных аналитических соотношений.

В начале учебно-методического пособия рассмотрены системы уравнений, используемые для описания разрядных процессов, указаны пределы применимости разных приближений – кинетического уравнения, Лоренцева приближения для кинетического уравнения, дрейфово-диффузионного приближения. Для задачи о развитии электронной лавины проведено сравнение решений в разных приближениях, иллюстрирующее достоинства и недостатки каждого из них.

Большая часть моделей, приведенных в пособии, создана на основе дрейфово-диффузионного приближения для описания движения электронов и ионов. Данное приближение наиболее часто применяется для подобных расчетов, так что с практической точки зрения оно наиболее интересно.

Описание разрядных явлений начинается с задачи о несамостоятельном разряде в простейшей системе электродов плоскость-плоскость. В двух предельных случаях – больших и малых токов – существуют приближенные аналитические решения для данной проблемы. Однако анализ численной модели показывает, что упрощенное решение для малых токов в ряде интересных случаев не реализуется, поскольку не учитывает некоторые ключевые физические механизмы, например диффузию. Таким образом, обосновывается эффективность применения методов компьютерного моделирования при анализе разрядных процессов.

Для каждого из разрядных явлений – лавины, стримера, коронного разряда, электрического

ветра приведен анализ компьютерных моделей и экспериментальных данных. Сопоставление этих данных позволяет глубже понять закономерности физических процессов.

Следует отметить, что некоторые результаты по компьютерному моделированию и экспериментам, приведенные в учебно-методическом пособии, были ранее опубликованы лишь частично и сами по себе представляют значительный научный и практический интерес.

Значительная часть учебно-методического пособия посвящена стримерной форме разряда. Это явление изучалось на протяжении нескольких десятилетий, однако компьютерные модели позволили объяснить ряд особенностей лавинно-стримерного перехода и развития стримеров в системах с различной конфигурацией: в сильно- и слабонеоднородных полях, а также при разной полярности активного электрода.

Особенности распространения стримеров в системах со сложной геометрией исследовались мало, однако представляют несомненный практический интерес. Ведь одной из важнейших практических проблем, связанных со стримерами, является изучение особенностей пробоя, который может следовать за замыканием стримерным каналом электродов. Путем изменения конфигурации системы можно остановить рост стримерного канала либо направить его в нужную сторону. Подробно описана пространственная структура стримеров, проанализирован процесс замыкания стримерной головки на электрод отрицательной полярности, сопровождающийся образованием особого тонкого прикатодного слоя, существенно отличающегося от аналогичного хорошо изученного слоя в тлеющем разряде.

Благодаря компьютерным моделям удалось также проанализировать процесс взаимодействия стримеров с твердым диэлектрическим барьером и объяснить процесс их «проникновения» сквозь этот барьер. Подобные модели могут быть интересны разработчикам т.н. барьерной изоляции, а также в связи с задачами обработки поверхностей стримерным разрядом.

Разделы, посвященные стримерам, дополнены богатым экспериментальным материалом, демонстрирующим особенности развития стримеров при разных условиях. Описана оригинальная методика визуализации структуры поверхностного заряда, оставляемого стримерами на поверхности барьера, приведены в большом количестве фотографии структур поверхностного заряда. На основе анализа этих структур установлены основные закономерности механизма т.н. огибающего пробоя. Наряду с этим приведен большой объем экспериментального материала,

связанный с механизмом возникновения встречных стримеров. Выявлен и описан новый механизм пробоя т.н. встречными лидерами. В частности, приведены и описаны осциллограммы тока при пробое встречными лидерами и выявлены существенные отличия от пробоя огибающим лидером.

Две главы посвящены исследованиям коронного разряда: шестая – экспериментальному исследованию с использованием высокочувствительных камер для записи светимости чехла короны, седьмая – компьютерному моделированию. Описаны различные формы коронного разряда постоянного напряжения во всем диапазоне существования короны – от порога и до пробоя, а также подробно – различия структуры чехла короны от положительного и отрицательного электродов. Впервые зарегистрирована и детально рассмотрена очаговая структура отрицательного коронного разряда постоянного напряжения, возникающая на шаровых электродах. Приведены экспериментальные данные о характере очагов в зависимости от размера и состояния поверхности активного электрода и подаваемого напряжения.

Описаны переходы между грибообразной, диффузной и стримерной формами коронного разряда постоянного напряжения. Некоторые из этих форм описаны впервые.

Приведены компьютерные модели коронного разряда в диапазоне их существования, объясняющие пороговую стадию, режим развитого коронного разряда и переходы между разными его формами. Объяснена природа импульсов Тритчеля. Показано, что понятие чехла коронного разряда как области, где ионизация доминирует над процессами прилипания и рекомбинации электронов, нельзя отождествлять с областью свечения – последняя значительно шире. А также, что возникновение предпробойной диффузной формы связано с явлением отлипания электронов: во внешней зоне коронного разряда присутствует концентрация электронов, которая при достижении напряженностью определенного значения начинает возбуждать молекулы газа и излучать свет.

Особое внимание уделено влиянию свойств газа на коронный разряд, разобрана возможность такого явления, как коронный разряд в неэлектроотрицательном газе, на примере азота и аргона.

Анализ одномерных моделей чехла коронного разряда показал, что широко применяемые приближения о свойствах электрического поля в чехле коронного разряда выполняются с хорошей точностью. В работе также обсуждается известный метод Дейча-Попкова и приводятся ал-

горитм и программа его использования для моделирования внешней зоны коронного разряда в известном пакете компьютерного моделирования ANSYS.

Глава 10 посвящена влиянию твердого диэлектрического барьера на коронный разряд. Выявлены и описаны различные формы коронного разряда и влияние барьера на эти формы. Особое внимание уделено поверхностному заряду, наносимому короной на твердый диэлектрический барьер, и его влиянию на структуру чехла коронного разряда.

Заключает пособие глава об экспериментальном исследовании и компьютерном моделировании электрического ветра – течения, возникающего в газе при коронном разряде. Это явление находится на стыке газодинамики и физики плазмы и широко применяется в различных электрофизических устройствах, например промышленных электрофильтрах. Благодаря экспериментальным исследованиям в основном выявлялась взаимосвязь видимой структуры чехла короны с возникающим электрическим ветром. Приведены описание оригинальной экспериментальной установки по изучению кинематической структуры электрического ветра, а также результаты изучения его скоростных характеристик. Кинематика электрического ветра исследуется совместно с изучением его токовых характеристик. Разносторонне анализируются кинематические и токовые характеристики электрического ветра и их взаимосвязь со структурой чехла короны.

Значительный материал посвящен изучению кинематической структуры электрического ветра в случае многоочаговой короны. Исследовано взаимовлияние очагов короны и приведена многогольчатая конструкция электрода, в которой взаимное гашение отдельных ее очагов минимизировано. Рассмотрено использование электрического ветра в качестве двигателя электрофизического летательного аппарата – лифтера.

Представлена упрощенная одномерная компьютерная модель, в которой было применено приближенное описание чехла коронного разряда. Его размер обычно можно считать малым по сравнению с масштабами течения, в то же время расчет процесса в чехле занимает основную часть ресурсов при моделировании. Результаты компьютерного моделирования электрического ветра сопоставлены с результатами экспериментального исследования. Показано, что компьютерная модель позволяет предсказать структуру возникающего электрогазодинамического течения.

Рассмотрено влияние электрического ветра на теплообмен за счет естественной конвекции.

Экспериментальные исследования, проведенные с помощью компьютеризированной установки Теплера – ИАБ 451, показали, что удельную мощность теплообмена можно существенно – в несколько раз – повысить за счет использования в качестве внешнего обдува электрического ветра от многоигльчатого электрода.

Приведена компьютерная модель теплообменной установки на основе электрического ветра в воздухе. Результаты компьютерного моделирования сопоставлены с результатами экспериментальных исследований. Сопоставление показало удовлетворительное соответствие, что позволяет говорить о разработке метода расчета интенсификации теплообмена при помощи электрического ветра в воздухе.

На основании всего вышесказанного можно утверждать, что в рецензируемом пособии на современном уровне рассмотрен широкий спектр различных электрофизических явлений с активным использованием современных приемов обработки информации. Книга содержит большое количество оригинальных фотографий различных электрофизических процессов. Представленный материал, несомненно, представляет интерес как для специалистов, работающих в областях науки, связанных с электроразрядными процессами в газах, так и студентов и аспирантов, специализирующихся в области электрофизики.

Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук,
профессор Санкт-Петербургского
государственного политехнического
университета
В.С. Нагорный