

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ГАЗАХ ЗА ТРИДЦАТЬ ЛЕТ В СССР

Н. А. Капцов

1. ВВЕДЕНИЕ

Учение об электрических явлениях в газах представляет собой в настоящее время обширную область физики, в которой с вопросами, непосредственно связанными с «электрическими разрядами», тесно переплетаются вопросы физики атомных и электронных явлений. Изучение и объяснение макроскопических явлений, сопровождающих прохождение электрического тока через газы, невозможно без исследования так называемых элементарных процессов, имеющих место при взаимодействии молекул, атомов, ионов, электронов, фотонов как в объёме газа, так и на границе между газом, с одной стороны, и металлами, полупроводниками и диэлектриками, с другой (фотоэффект, вторичная эмиссия, термоэлектронная и автоэлектронная эмиссия и т. д.). Работа, проделанная в СССР в этом последнем направлении, уже нашла своё отражение в статье С. Ю. Лукьянова «Советская электроника за 30 лет»^{*)}. Это значительно облегчает поставленную перед нами задачу. Однако для того чтобы полностью оценить всё то, что сделано за тридцать лет советскими физиками в области электрических разрядов в газах, необходимо взять обе статьи в целом, так как физика электрических разрядов в газах неотделима от «электроники».

Вопросами электрических разрядов в газах русские физики занимались и в дореволюционное время. Широко известны наблюдения основоположника русской физики Михаила Васильевича Ломоносова над грозowymi разрядами. Им впервые установлена возможность извлекать электрические заряды из атмосферы в ясную погоду при отсутствии грозы. Искусный русский физик-экспериментатор Василий Владимирович Петров в 1802 г. открыл явление электрической дуги на несколько лет раньше, чем эта форма электрического разряда была обнаружена зарубежными учёными. Петров

^{*)} Успехи физических наук, т. XXXIII, вып. 4, стр. 549.

не только открыл электрическую дугу, но и исследовал протекание ряда физических и химических явлений в зоне дуги. В последующие времена дуга Петрова неоднократно привлекала внимание русских физиков. Над её исследованием много потрудились П. Н. Яблочков, установивший влияние паров тугоплавких веществ на электрическую дугу и на её излучение. Д. А. Лачинов исследовал совместно с В. Н. Чиколевым зависимость силы тока и яркости излучения дуги Петрова от ряда условий. Он пытался также непосредственно обнаружить на опыте «электродвижущую силу поляризации», которую и в то время, и ещё много позднее, приписывали электрической дуге.

Наконец, В. Ф. Миткевич в первых годах XX столетия однозначно установил, что причиной, поддерживающей дугу Петрова, является выход большого числа электронов из раскалённого катода и что эта эмиссия электронов есть не что иное, как «эффект Эдисона», как выражались тогда, или термоэлектронная эмиссия по современной нам терминологии. После того как Александр Степанович Попов применил искровой генератор Герца в качестве передатчика радиосигналов, возникла задача об изучении искры, проскакивающей в разрядном промежутке генератора, и о влиянии параметров этой искры на генерацию электромагнитных волн. Этим вопросом занялся ученик А. С. Попова Д. А. Рожанский. Он установил, что в этом случае электрическая искра действительно представляет собой, согласно высказанному Дж. Дж. Томсоном мнению, перемежающуюся электрическую дугу. Рожанский исследовал ход сопротивления этой дуги со временем и нашёл этот ход линейным.

Другой последователь А. С. Попова, Владимир Константинович Лебединский, всесторонне исследовал условия возникновения электрической искры и установил ещё не вполне объяснённый современными теориями факт, что облучение катода искрового промежутка дуги ультрафиолетовой радиацией не всегда понижает напряжение зажигания искры («зажигает искру», по выражению Лебединского), а в некоторых условиях повышает («гасит искру» по Лебединскому).

В настоящее время установлено, что «зажигание» имеет место при непосредственном возникновении искры, а «тушение» — при переходе в искру коронного разряда между положительно заряженным остриём и вторым электродом в виде шара или диска.

Очень интересны относящиеся к 1886 — 1887 гг. исследования И. И. Боргмана над тихим разрядом. И. И. Боргман помещал в разных точках в пространстве между двумя электродами, находящимися в атмосферном воздухе, очень маленькие и легкоподвижные магнитные стрелки. При наложении на электроды высокого напряжения и при прохождении через этот промежуток тихого разряда магнитные стрелочки, расположенные в разных местах, по разному

отклонялись от направления магнитного меридиана. Таким образом, Боргману удалось показать, что при тихом разряде через воздух электрические заряды передвигаются от одного электрода к другому по строго определённым путям. В той же работе И. И. Боргман указал на возможность применения пламени небольших размеров в качестве надёжного зонда для определения электрического потенциала воздуха в той точке, в которой находится кончик пламени.

Из дореволюционных работ в России по газовому разряду необходимо особенно отметить исследования профессора Московского университета Александра Григорьевича Столетова по «актино-электрическому эффекту» (1888—1890 гг.). Этот эффект представлял собой сочетание двух явлений: фото-эффекта на катоде и несамостоятельного разряда в газе. Столетов исследовал актино-электрический эффект в воздухе не только при атмосферном, но и при пониженном давлении, вплоть до 0,002 мм ртутного столба. Он установил, что при прочих равных условиях сила разрядного тока при понижении давления сперва увеличивается, проходит через максимум, а затем опять уменьшается. Изменяя не только давление газа, но и напряжение между катодом и анодом, а также расстояние между ними, Столетов обнаружил, что максимальное значение тока соответствовало всегда одному и тому же постоянному отношению напряжённости электрического поля в разрядном промежутке E к давлению газа p . Английский физик Таунсенд, построивший около 1900 г. первую количественную теорию несамостоятельного разряда, исходил в качестве экспериментального материала из результатов исследований Столетова. Таунсенд назвал эффект влияния давления на силу тока «эффектом Столетова», а значение отношения $\frac{E}{p}$, соответствующее максимальному значению тока, «константой Столетова».

Измерив коэффициент объёмной ионизации воздуха α при разных давлениях и разных напряжённостях поля, Таунсенд подсчитал на основании своей теории «константу Столетова». Полученное им значение этой константы для воздуха оказалось в полном согласии с величиной, найденной Столетовым экспериментально. Явления электрических разрядов в газах оставались в центре внимания А. Г. Столетова до конца его дней. За день до его смерти при последнем свидании с ним П. Н. Лебедева, тяжело больной А. Г. Столетов «навёл разговор на свою любимую тему о газовых разрядах». Прощаясь, он чуть слышно добавил: «советую заняться этими вопросами — они очень интересны и очень важны»^{*}). Советские физики в настоящее время это завещание А. Г. Столетова выполнили.

^{*} П. Н. Лебедев, Собрание сочинений, стр. 285—6, Москва, 1913.

II. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Первое десятилетие после Октябрьской революции совпало со временем бурного развития физики электрических явлений в газах, получившей мощный толчок вперёд благодаря классическим экспериментам 1913 г. в области ионизации и возбуждения атомов при неупругих соударениях электронов, а также благодаря успехам теории атома Бора. Существенным этапом в этом развитии явился предложенный Ленгмюром для изучения разряда метод зондовых характеристик и введённое им же представление о плазме газового разряда.

В то же время начавшая развиваться в СССР новая отрасль промышленности, имеющая целью изготовление электровакуумных приборов, поставила перед советскими физиками ряд вопросов, тесно связанных с электрическими явлениями в газах. Как в Ленинграде, так и в Москве образовались ячейки физиков, работающих в этой области. В Ленинграде они поддерживали тесную связь с заводом «Светлана», изготовлявшим в то время в основном пустотные приборы. Внимание ленинградских физиков было направлено на очень существенные для пустотных приборов явления всех видов электронной эмиссии. Соответствующие работы и достижения ленинградских физиков изложены в упомянутой выше статье С. Ю. Лукьянова. Вопросами газового разряда и, в частности, вопросами изучения плазмы занялся Д. А. Рожанский со своими учениками Л. А. Сена и В. Ф. Коваленко. В отличие от зарубежных исследователей, чисто механически продолжавших работы Ленгмюра, слепо следуя указанному последним методу, Д. А. Рожанский, В. Ф. Коваленко и Л. А. Сена подвергли метод зондов Ленгмюра критике в одном из его основных пунктов, — а именно, в вопросе о методах экстраполяции ионного тока. Эта экстраполяция необходима для определения электронного тока на зонд при небольшом отрицательном потенциале последнего по отношению к окружающему газу, так как сила электронного тока находится из результатов измерения суммарного тока на зонд, представляющего собой разность между электронным и ионным токами.

Вместо введённой Ленгмюром линейной экстраполяции, приводящей к абсурдным значениям ионного тока при потенциале зонда, равном потенциалу окружающего газа, Д. А. Рожанский, В. Ф. Коваленко и Л. А. Сена предложили экстраполяцию по параболе, свободную от указанного выше недостатка. Внезапная кончина Д. А. Рожанского прервала усиленную работу созданной им лаборатории над плазмой газового разряда. Эти работы были продолжены в последующие годы Л. А. Сена. В своих работах Сена продолжил критическое изучение метода зондов Ленгмюра и установил ряд факторов, которые часто приводят к большой неточности в количественных данных, получаемых при помощи метода зондов, особенно

при определении такого существенного внутреннего параметра разряда, как концентрация свободных электронов в плазме. За последние годы Сена внёс в учение о плазме разряда существенно новый элемент. Ленгмюр первоначально полагал, что тепловое движение положительных ионов соответствует максвелловскому распределению скоростей и может быть охарактеризовано указанием «температуры» этого распределения так же, как указывается температура электронного газа. Однако все попытки определить при помощи метода зондов температуру положительных ионов приводили к данным, не только противоречивым между собой, но и несовместимым с представлениями о характере обмена энергией между ионами и нейтральными частицами газа. Таким образом, вопрос о специфике движения положительных ионов в плазме оставался открытым. Л. А. Сена исследовал вопрос об эффективном поперечном сечении частиц газа в плазме по отношению к различного рода взаимодействиям этих частиц с положительными ионами и пришёл к выводу, что наиболее часто имеющим место видом взаимодействия положительных ионов с нейтральными частицами газа является отнюдь не упругое столкновение, приводящее к усиленному обмену энергией, а процесс перезарядки. В результате этого процесса положительный ион превращается в нейтральную частицу, быстро утрачивающую избыточную энергию при упругих столкновениях, а частица, перехватившая заряд иона (отдавшая последнему валентный электрон), превращается в положительный ион. Новый положительный ион ускоряется под действием градиента потенциала в разряде и двигается с большой скоростью прямолинейно в направлении поля до следующего акта перезарядки. На это специфическое движение ионов наложено лишь очень слабое хаотическое движение в различных направлениях. Поэтому сопоставление средней энергии положительных ионов с какой-то температурой ионов теряет смысл. Эта картина движения ионов и теоретические подсчёты средней их скорости недавно нашли подтверждение в опытах С. Э. Фриша и Ю. М. Кагана, разработавших оптический метод исследования движения положительных ионов. Вопрос о распределении скоростей среди электронов в плазме газового разряда разрабатывал теоретически Б. И. Давидов. Б. И. Давидов и А. И. Змановская дали теорию электронного тока на зонд с учётом явлений диффузии электронов в окружающей зонд области.

В Москве вопросами плазмы газового разряда и теорией зондов занимался Б. Н. Клярфельд (Всесоюзный электротехнический институт).

В своей докторской диссертации Б. Н. Клярфельд подробно выяснил пределы применимости метода зондов. Вместе с В. Л. Грановским и В. А. Фабрикантом он дал в специальной статье критику ряда работ, в которых теория зондов применялась неправильно. В то же время Б. Н. Клярфельд, учитывая все предосторожности, необходимые при применении метода зондов, сам производил

большое количество измерений различных параметров плазмы в зависимости от разных условий. Ему удалось установить влияние эффекта Рамзауера на градиент потенциала в положительном столбе. Он выяснил условия, при которых в плазме начинают играть существенную роль процессы ступенчатой ионизации, и разработал экспериментальный метод, позволяющий однозначно судить о наличии этих процессов.

В своё время Ленгмюр и Тонкс не дали полного решения задачи о плазме, а обрисовали лишь общие контуры теории, решив попутно ряд частных вопросов. Б. Н. Клярфельд проверил некоторые выводы теории Ленгмюра (в парах калия и в парах ртути) и указал границы применимости этих выводов. Затем Б. Н. Клярфельд, применив ряд остроумных и удачных упрощений, решил до конца задачу о плазме для случая низких давлений газа. Проведённое им количественное сравнение теории с опытом подтверждает правильность полученных теоретических соотношений. По вопросу о балансе энергии плазмы, от обсуждения которого Ленгмюр в своё время отказался, как от ещё преждевременного, Б. Н. Клярфельд обобщил и обработал многочисленный имеющийся в литературе материал и значительно дополнил его собственными измерениями. На этой основе он построил удачную схему баланса мощности в положительном столбе при различных давлениях как для случая малой (миллиамперы), так и для случая большой (несколько ампер) силы тока.

Согласно этой схеме, мощность, расходуемая на одном сантиметре длины разрядной трубки, складывается из мощности, рассеиваемой на стенках трубки, мощности, рассеиваемой в объёме газа, мощности излучения резонансных линий спектра и мощности излучения нерезонансных линий. Схема позволяет судить об относительных значениях всех этих слагаемых мощности в широком диапазоне давлений от предельно низких до очень высоких.

Эти работы Б. Н. Клярфельда дали возможность подойти количественно к вопросу о причинах большей или меньшей светоотдачи газового разряда и имеют существенное значение для разработки источников света возможно большей экономичности.

В экспериментальных работах сперва Д. В. Зернова, а затем Клярфельда и Тараскова проведено обширное исследование зависимости светоотдачи разряда в парах натрия от параметров разряда, от давления паров натрия и от наличия в разрядной трубке того или иного инертного газа. Этими работами установлена количественная зависимость светоотдачи натриевой лампы от диаметра трубки, от плотности тока и от давления паров натрия, а следовательно, и от температуры стенок разрядной трубки. Так как оптимальная сила тока не приводит при обычных условиях горения разряда в стеклянной трубке к оптимальной температуре стенок, то из опытов Клярфельда вытекает, что для получения возможно высокой светоотдачи должны быть созданы специальные условия теплообмена,

путём устройства соответствующей тепловой защиты трубки. Разработав конструкцию натриевых ламп в этом направлении, Клярфельд добился светоотдачи опытных образцов до 120 люменов на ватт, что в семь раз превышает светоотдачу мощных ламп накаливания и в десять раз светоотдачу маломощных.

В ртутных лампах высокого давления зависимость светоотдачи от различных условий была изучена Клярфельдом и Плохоцким.

С несколько иной стороны подошли к вопросу о дальнейшем развитии метода зондов и об исследовании плазмы Г. В. Спивак и Э. М. Рейхрудель. Экспериментируя с зондами, вокруг которых искусственно создавалось магнитное поле, они пришли к выводу, что наличие магнитного поля существенно изменяет условия протекания процессов газового разряда. Поэтому исследовать, например, поведение положительных ионов в плазме, отклоняя в сторону попадающие на зонд электроны при помощи магнитного поля, нельзя. Опираясь на законы движения электронов в электрическом и магнитном полях, Спивак и Рейхрудель построили обобщённую теорию зондов. Теория, разработанная Ленгмюром для случая отсутствия магнитных полей, представляет собой частный случай этой обобщённой теории. Выяснив влияние магнитного поля на ход зондовых характеристик, Спивак и Рейхрудель оказались тем самым в состоянии перейти к исследованию при помощи обобщённого метода зондов поведения плазмы газового разряда в магнитном поле. В частности, ими был изучен вопрос о контракции (стягивании) положительного столба в равномерном и неравномерном магнитном поле и о происходящем при этом изменении законов распределения концентрации свободных электронов вдоль по радиусу трубки — работы Г. В. Спивака, Э. М. Рейхруделя, Х. Н. Фаталиева, О. Н. Репковой. Другой вопрос, получивший разрешение в работах Спивака и Рейхруделя при участии А. А. Зайцева, это вопрос о влиянии метастабильных атомов на электронный ток на зонд. Такое влияние должно иметь место благодаря выходу электронов из поверхности зонда за счёт энергии метастабильных атомов, попадающих на зонд. Результаты прежних исследований не давали возможности однозначно судить о величине этого эффекта и о вносимых искажениях. Опыты Спивака и Рейхруделя показали, что этот эффект имеет заметную величину и пренебрегать им нельзя.

Метод, применённый ими для решения вопроса (уничтожение метастабильных атомов неона путём поглощения нерезонансного излучения мощной неоновой лампы), позволил тем же авторам установить роль метастабильных атомов и в другом случае. Ими, а также А. А. Зайцевым, было чётко установлено влияние метастабильных атомов на величину катодного падения потенциала при тлеющем разряде в неоне. А. А. Зайцевым исследовано влияние посторонних примесей на продольный градиент потенциала в положительном столбе разряда в парах ртути и в благородных газах как в

чистых газах, так и при наличии различного рода примесей. М. И. Родин, исследуя токи на несколько зондов, расположенных вдоль длинной разрядной трубки на разных расстояниях от накаливаемого оксидного катода, установил, что вблизи катода максвелловское распределение скоростей в плазме искажено наличием быстрых электронов, ускоряемых в катодном слое. Чем дальше от катода находился зонд, тем меньше было искажение прямолинейной полулогарифмической характеристики электронного тока на зонд. На некотором расстоянии от катода искажение полностью исчезало.

Существенное значение при работе электровакуумных приборов, в которых используется электрический разряд в газах (ртутные выпрямители, газотроны, тиратроны, игнитроны), имеет время деионизации, т. е. то время, за которое практически исчезает плазма. Вопросы деионизации подробно исследованы В. Л. Грановским в ВЭИ. Делая определённые допущения о механизме процесса деионизации и учитывая законы амбиполярной диффузии ионов и электронов к стенкам разрядной трубки, В. Л. Грановский дал количественную теорию деионизации и произвёл расчёт хода деионизации для ряда частных случаев. При низком давлении рекомбинация ионов и электронов происходит исключительно на стенках; её ход, согласно теории Грановского, зависит от распределения скоростей ионов. При среднем давлении движение заряженных частиц к стенкам носит уже характер диффузии, скорость которой с течением времени замедляется. Существенную роль в этом случае играет уменьшение электронной температуры. Об этом уменьшении делаются определённые количественные заключения. На основании всего этого, В. Л. Грановский указал закон, по которому происходит деионизация газа со временем. При низких давлениях этот закон представляет собой экспоненциальную зависимость. При более высоких давлениях имеют место отступления в сторону замедления процесса деионизации. В. Л. Грановский дал также расчёт хода деионизации при высоких давлениях, когда основным фактором является рекомбинация ионов и электронов в объёме газа. Далее, им рассмотрено влияние на деионизацию электрического поля. Найдена логарифмическая зависимость времени деионизации от приложенного напряжения. В экспериментальной части работ В. Л. Грановского получено хорошее совпадение теории с опытом для случая паров ртути и сделан ряд практических выводов, существенных для теории ртутного выпрямителя и тиратрона. Им подробно рассчитано (совместно с Л. Ревердатто) деионизирующее действие сеток в ртутных выпрямителях, исследованы обратные токи в многофазных ртутных выпрямителях, а также обнаружены некоторые специфические явления, имеющие место в отдельных отверстиях сеток. Эти явления привели к представлению о разрежении газа и сопровождающей это разрежение полной ионизации в местах сужения разрядного промежутка. Они были подвергнуты специальному исследованию В. Н. Кляр-

фельдом в связи с вопросом о причинах наблюдаемого в мощных выпрямителях «разрыва дуги», а также В. Л. Грановским. Воспользовавшись этим явлением, последний построил особые генераторы электрических колебаний релаксационного типа.

Установлением параметров разряда в парах ртути применительно к стеклянным (маломощным) ртутным выпрямителям занимался в лаборатории НИИФ МГУ, под руководством С. Д. Гвоздовера, Д. Р. Конасков, специально исследовавший при этом диффузию электронов в парах ртути.

К вопросу о времени деионизации газоразрядного промежутка тесно примыкает вопрос об инерционности свечения разряда. Вопрос этот имеет практический интерес в связи с предпринимавшимися попытками осуществить интенсивный, достаточно чётко модулируемый источник света для применения на приёмной станции при телевизионной передаче. В этом направлении в ВЭИ выполнено несколько работ В. И. Романовым и Б. Н. Клярфельдом, добившимися чёткой модуляции в области частот от 50 до 14 000 герц.

III. ЛАВИННЫЕ РАЗРЯДЫ. ЗАЖИГАНИЕ «САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА»

Помимо плазмы существенную роль в газовых разрядах играют области, в которых пучки быстрых электронов, эмиттированных катодом и ускоренных полем разряда, производят усиленную ионизацию частиц газа, необходимую для образования плазмы. При раскалённом катоде основное значение имеет термоэлектронная эмиссия. Область, лежащая между катодом и плазмой, стягивается при этом в очень тонкий «ленгмюровский» слой. В случае холодного катода в так называемом катодном тёмном пространстве, имеющем тем большую длину, чем меньше давление газа, происходит нарастание электронных лавин. Небольшое число электронов, покидающих в этом случае катод, быстро увеличивается по направлению к той области разрядного промежутка, где имеется налицо плазма или непосредственно анод. По пути движения лавины не только образуются новые свободные электроны и положительные ионы, но происходит также возбуждение частиц газа, приводящее к излучению фотонов. Попадание положительных ионов и фотонов (а также возбуждённых атомов) на катод вызывает выход из катода электронов, поддерживающих разряд. Этот выход электронов из катода характеризуется коэффициентом поверхностной ионизации γ (γ -процессы).

Нарастание электронных лавин определяется коэффициентом объёмной ионизации α (число ионизаций, производимых в данном газе одним электроном при продвижении на один сантиметр от катода к аноду). Положительный пространственный заряд, скапливающийся на пути следования лавины вследствие того, что скорость движения электронов много больше, чем скорость движения поло-

жительных ионов в электрическом поле той же интенсивности, определяет собой, согласно закону Пуассона, искажение электростатического поля между электродами, вызванное газовым разрядом. Для протекания всех явлений в лавинных областях разряда, а также для процессов «зажигания» самостоятельного разряда имеет существенное значение зависимость коэффициента α от различных условий. Этот вопрос, а также тесно связанный с ним вопрос о напряжении зажигания разряда был значительно продвинут работами группы физиков Московского университета. С. К. Моралёв разработал теорию коэффициента объёмной ионизации α . Теория Моралёва позволяет подсчитать коэффициент α на основе количественных данных о различного рода взаимодействиях между электронами и частицами газа и объясняет влияние различных факторов на коэффициент α и на напряжение зажигания разряда. Теория Моралёва внесла большую ясность в понимание экспериментальных результатов и служит надёжным основанием для практического воздействия на напряжение зажигания. Экспериментальные работы И. И. Глотова и И. И. Балоба подтвердили выводы Моралёва и дали много практически важных данных по вопросу о влиянии малых посторонних примесей на напряжение зажигания разряда в благородных газах. Сюда следует отнести также работы Б. Н. Клярфельда на ту же тему. Одновременно Н. А. Капцов дал теоретический подсчёт нарастания пространственных зарядов и искажения поля при прохождении ряда последовательных лавин в период зажигания разряда. Этот расчёт подвёл количественное обоснование под объяснения, данные незадолго до этого зарубежными физиками, малой продолжительности времени формирования разряда при атмосферном давлении. В этом цикле работ следует также отметить работу И. И. Глотова над количественным влиянием соударений второго рода в неоне на силу тока самостоятельного разряда. К области лавинных разрядов относятся проведённые в той же лаборатории МГУ работы П. В. Тимофеева, И. Ф. Кварцхава и Н. Пенина по исследованию причин инерционности разрядов в газонаполненных фотоэлементах. В этих работах была дана правильная оценка той доли инерционности, которая вызвана временем пробега ионов от анода до катода. Экспериментально показано, что эта причина инерционности имеет место в большей или меньшей степени во всех случаях и дополняется, а иногда и перекрывается действием метастабильных атомов с большим временем жизни.

При малом диаметре разрядной трубки на процесс зажигания разряда может влиять близость стенок к пути прохождения лавин. Такие условия «затруднённого разряда» имеют место в большом числе разрядных приборов. Зажигание разряда в этих условиях исследовано Катышевым. Одной из причин, затрудняющих зажигание разряда в этих случаях, является образование отрицательных поверхностных зарядов на стенках трубки. Более детально влияние внеш-

них электрических и магнитных полей на зажигание разряда исследовано Е. Л. Столяровой и Г. В. Спиваком. Влияние магнитного поля на протекание начальных стадий разряда должно сильно отличаться от влияния магнитного поля на поведение плазмы разряда вследствие того, что в первом случае преобладает направленное движение электронов, во втором их беспорядочное тепловое движение. Предпринятое Г. В. Спиваком и Е. Л. Столяровой исследование влияния магнитных полей различной конфигурации на развитие разряда в длинных трубках подтвердило правильность этой точки зрения. В ходе исследования установлен периодический ход напряжения зажигания в присутствии магнитного поля при изменении расстояния между электродами. Это явление интерпретировано Спиваком и Столяровой как периодическая фокусировка электронов; показано также, что при наличии магнитного поля между электродами развития газового разряда и формулами электронной оптики существует определенное соответствие.

Упомянутые здесь экспериментальные работы по напряжению зажигания относятся к газам при малых давлениях. Напряжение зажигания различных газов при больших давлениях изучал в Физическом Институте АН СССР им. П. Н. Лебедева Б. М. Вул, отчасти совместно с И. Гольдманом. Этими исследованиями установлено, что в случае неоднородного поля при прочих равных условиях напряжение зажигания с повышением давления проходит через максимум. Вул и Гольдман нашли также, что пробивное напряжение растёт с повышением температуры. Это происходит, как они указывают, из-за влияния диффузии на плотность положительного пространственного заряда, возникающего при пробое. В том же институте Коваленко исследовал влияние различных многоатомных газов на напряжение зажигания в воздухе. Устойчивый эффект повышения пробивного напряжения даёт примесь четырёххлористого углерода.

К той же области исследования пробоя сжатых газов относятся работы Б. М. Гохберга, Э. Я. Зондберга, Я. М. Оксман и работа А. Г. Рзянкина.

Образующиеся на пути развития электронной лавины положительные ионы ускоряются электрическим полем разряда по направлению к катоду. Одним из следствий бомбардировки поверхности холодного катода положительными ионами является катодное распыление материала катода.

В приборах, использующих тлеющий лавинный разряд, катодное распыление представляет собой вредный фактор, приводящий к повышенной поверхностной проводимости стеклянных стенок прибора. Особенно вредно отражается катодное распыление на полезной продолжительности жизни газоразрядных источников света, так как оно приводит к уменьшению излучаемого светового потока. Полезным применением катодного распыления является создание тонких металлических плёнок. Исследование законов и условий катодного распы-

ления неоднократно производилось в Институте физики ВУАН Н. Д. Моргулисом и его сотрудниками (Бернадинер, Патюха) как по линии уточнения теории этого явления, так и по установлению ряда экспериментальных данных, имеющих практическое значение. Другой ряд работ по изучению катодного распыления принадлежит Ю. П. Маслаковцу.

IV. КОРОННЫЙ РАЗРЯД. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ РАЗРЯДЫ

Особую разновидность лавинных разрядов представляет собой коронный разряд. В этом случае область нарастания электронных лавин сосредоточена на участке большой напряжённости поля в так называемом коронирующем слое, облегающем электрод с малым радиусом кривизны (остриё, тонкий провод, острый край). В остальной «внешней» области разрядного промежутка налицо ионы одного только знака, одинакового со знаком коронирующего электрода. Коронный разряд приводит к потерям энергии, если он возникает на высоковольтных линиях электропередачи. Та же форма разряда находит полезное применение в технике осаждения взвешенных в газе посторонних частиц в электрофильтрах (очистка дымовых газов, улавливание «вылетающих в трубу» ценных химических продуктов) и в технике электросепарации размельчённых руд и других материалов. Старая теория коронного разряда, на которой базировались представления о коронном разряде инженеров-практиков и которая рассматривала коронирующий слой как простое продолжение металлического проводника при отсутствии электрического поля в этой области, была опровергнута Н. А. Капцовым, построившим теорию коронирующего слоя на основе современных теорий разряда и показавшим, что в коронирующем слое существует высокий градиент потенциала.

В работе Н. А. Капцова и С. К. Моралёва был исследован переход коронного разряда в искровой и указаны методы подсчёта «напряжения искрового перекрытия короны». В дальнейших работах Капцова дан метод расчёта толщины коронирующего слоя и установлено, что толщина коронирующего слоя на положительном электроде при прочих равных условиях всегда больше, чем толщина коронирующего слоя на отрицательном электроде. В практическом вопросе о предельном заряде и о скорости зарядки взвешенных во внешней области коронного разряда посторонних частиц Н. А. Капцовым дан синтез теории зарядки этих частиц вследствие движения ионов под действием электрического поля и теории той же зарядки под действием беспорядочного теплового движения ионов. В НИИФ МГУ И. И. Гловым, С. К. Моралёвым и А. А. Власовой экспериментально исследовано влияние на коронный разряд слоя плохо проводящего электрический ток вещества, нанесённого на поверхность некоронирующего электрода, а также исследован потенциал,

возникающий на границе этого слоя и газа. В диссертации Э. М. Ба-лабанова разработана теория осаждения заряженных в коронном разряде частиц на движущемся осадительном электроде — теория, позволяющая сознательно разрабатывать приёмы электросепарации. В работах Меера, Мороховского и Капцова, а затем М. Я. Васильевой установлено, что, вопреки распространённому до этого мнению, начальная напряжённость поля коронного разряда зависит, при прочих равных условиях, от расстояния между электродами как в случаях провод — плоскость и острей — плоскость, так и в случае двух коаксиальных цилиндров.

Ряд исследований по коронному разряду проведён С. П. Жеб-ревским и В. И. Попковым в лаборатории НИОГАЗ треста Газо-очистка. Сюда относится ряд исследовательских работ, связанных с процессами, имеющими место в электрофильтрах, исследование зависи-мости вольтамперной характеристики коронного разряда от влаж-ности воздуха и т. д. Эти работы дали много ценных данных для практики конструирования и эксплуатации электрофильтров. Особо следует отметить работы по определению распределения поля во внешней области коронного разряда в отдельных случаях, например, при запылённом осадительном электроде, проведённые В. И. Поп-ковым по методу зондов Сато.

Особый случай коронного разряда имеет место, когда корони-руют оба электрода разрядного промежутка (например, два цилин-дрических провода одного и того же диаметра, натянутых парал-лельно друг другу). В этом случае во внешней области коронного разряда навстречу друг другу движутся ионы обоих знаков. Это создаёт специфические условия, приводящие к тому, что коронный разряд возникает при меньшей напряжённости поля у каждого из проводов, чем в случае однополярной короны, а сила разрядного тока больше, чем сумма токов с двух коронирующих независимо один от другого проводов. Экспериментальные исследования этого случая, имеющего существенное значение при передаче электроэнер-гии при помощи высоковольтных линий постоянного тока, были по-ставлены в НИИФ МГУ — диссертация М. Я. Васильевой — и, в более обширных размерах, В. И. Попковым в Энергетическом институте АН СССР.

Первоначальная намётка теории короны между двумя проводами набросана В. А. Капцовым. В. И. Попков подробно исследовал ход вольтамперной характеристики коронного разряда в случае двух ко-ронирующих проводов, а также изучил при помощи метода зондов Сато особенности распределения поля в разрядном промежутке. Это позволило ему сделать выводы о распределении пространственных отрицательного и положительного зарядов в промежутке между проводами, а также построить на этой основе детально разработан-ную приближённую теорию биполярной короны, дающую возмож-ность уверенно судить о размере потерь на корону при практиче-ской

ких условиях электропередачи постоянным током. Полученные В. И. Попковым расчётные данные сходятся не только с наблюдаемым им ходом вольтамперной характеристики, но и с почерпнутыми из литературы данными, полученными на экспериментальных линиях при очень высоких напряжениях.

Методы электросепарации материалов при помощи зарядки измельчённых частиц *), проходящих через внешнюю область униполярного коронного разряда, разработаны Э. М. Балабановым, П. М. Рывкиным и Н. Ф. Олофинским при участии С. П. Жебровского и доведены ими до внедрения этих методов на практике.

Особый вид коронного разряда представляет собой импульсная корона, возникающая на практике при перенапряжениях, вызванных на линиях электропередачи ударами молнии. Изучение импульсной короны имеет большое значение потому, что условия искрового перекрытия такой короны сильно отличаются от условий обычного искрового пробоя между проводом линии и так называемым «защитным троссом». В то же время процессы образования стримеров, имеющие отчасти место и в других случаях коронного разряда в атмосферном воздухе и не укладывающиеся в теорию коронного разряда, как непрерывного в пространстве и времени явления, особенно резко выражены в импульсной короне. Импульсной короне посвящены работы И. К. Федченко, а также Борисоглебского и др. В. В. Гей и С. Л. Зайнец принадлежат работы по изучению импульсной короны при помощи катодного осциллографа и по исследованию запаздывания зажигания разряда в этом случае. Своеобразный характер приобретает коронный разряд и его искровое перекрытие при высоких частотах. В области частот, соответствующей диапазону коротких и ультракоротких волн, высокочастотная корона переходит в ещё очень мало изученный факельный разряд. Условия возникновения этого вида разряда и протекание его были установлены в общих чертах в работах С. И. Зилитинкевича. Влияние постороннего электрического поля на «факельное истечение» было исследовано А. М. Прокофьевым, предложившим также факельный счётчик ионов. Развитие электрического факела с изменением давления исследовано Я. Матвеевым.

V. ИСКРОВОЙ РАЗРЯД И МОЛНИЯ

Систематические исследования вопросов, связанных с молнией, были начаты И. С. Стекольниковым в ВЭИ и затем с большим успехом продолжены им в Энергетическом институте АН СССР. Одним из основных задач, поставленных в этих исследованиях, был вопрос о причинах и условиях избирательной поражаемости различных объектов молнией. Вопрос этот был решён И. С. Стекольниковым путём

*) Авторское свидетельство Н. Ф. Олофинского, П. М. Рывкина и М. В. Бочковского № 189553, 1936 г.

изучения расположения наиболее часто поражаемых молнией объектов на разных участках земной поверхности в отношении электропроводности грунта, близости водных потоков и водоёмов, рельефа местности и т. д., а также путём моделирования ударов молнии в лабораторных опытах с искровым разрядом. Результатом исследования явилось заключение, что большая или меньшая вероятность поражения данного объекта молнией зависит, главным образом, от электропроводности грунта. Таким образом, если в узкой ложине между двумя холмами с крутыми скатами и с сухим песчаным плохо проводящим грунтом течёт ручей, то вероятность поражения молнией шеста, расположенного на некоторой высоте на склоне любого из этих холмов, меньше, чем вероятность поражения шеста, расположенного на нижней части склона, около ручья. Этот вывод имеет существенное значение для выбора трассы линий электропередачи и неоднократно был проверен во время ряда экспедиций в различные районы СССР, в том числе и горные. Во время этих экспедиций, организованных под общим руководством И. С. Стекольников, производились, с одной стороны, детальное изучение отдельных ударов молнии, а с другой — автоматическая регистрация значений различных параметров молнии (амплитуда тока в отдельном импульсе грозового разряда, полярность молнии, кратность импульсов, имеющих место во время одного удара молнии и т. д.). Для исследования протекания различных стадий молнии во время одного удара применялись методы временной развёртки явления на фотографической ленте, в специальных аппаратах, разработанных и сконструированных в ЭНИН по типу так называемых камер Бойса и при помощи записи импульсов молнии катодным осциллографом, также построенным специально для этой цели.

Регистрация параметров возможно большего числа молний производилась при помощи ферромагнитных регистраторов, основанных на намагничивании током молнии стержней из ферромагнитного материала, а также при помощи клидонографов (приборов, использующих фигуры Лихтенберга, как простых, так и с записью фигур на вращающемся барабане). Вместе с И. С. Стекольниковым в этих работах принимали участие А. А. Ламдон, В. С. Комельков, А. Беляков. Несколькими экспедициями, предпринятыми в горные районы Азербайджана, руководил и результаты их обрабатывал Али-Заде. Результаты всех этих исследований привели к значительному расширению имевшихся ранее данных о молнии, а также позволили установить ряд новых фактов. Так например, однозначно установлено, что первый лидер молнии (первый импульс, пробивающий неионизированный воздух и предшествующий образованию «главного канала» молнии) вовсе не должен быть непременно так называемым ступенчатым лидером, а может, в ряде случаев, распространяться непрерывно от отрицательно заряженного облака к земле. Наблюдения Стекольников и Али-Заде показали также, что в подавляющем числе

случаев молнии, проскакивающие между грозовыми тучами и землёй, являются отрицательными молниями, т. е. распространяются от отрицательно заряженного облака к положительно заряженной земле.

В лабораторных опытах с искровым разрядом И. С. Абрамсоном и И. С. Маршаком было показано, что главный канал искры имеет тотчас после образования этого канала определённое ограниченное поперечное сечение и только сравнительно медленно разрастается в ширину. Сила тока в главном канале искры ограничена наступлением в нём полной ионизации. Поэтому в первые моменты после пробоя напряжение на концах искрового канала принимает значение, сильно превышающее напряжение между электродами дугового разряда. Для дальнейшего исследования этих стадий искрового разряда И. С. Стекольниковым предложена и разработана новая осциллографическая схема, позволяющая использовать очень большую скорость осциллографической записи сравнительно простыми методами.

Теория искрового разряда в стадии образования и роста главного канала набросана И. С. Маршаком. Им же дана критика теории начальных стадий искрового разряда Лёба и Мика и высказаны новые оригинальные предположения об протекании элементарных процессов во время этих стадий.

Ряд советских физиков — И. С. Абрамсон, И. И. Левинтов, С. М. Райский, В. Г. Корицкий, Н. Н. Соболев и др. во главе с С. Л. Мандельштамом изучали искровой разряд как источник излучения для спектрального анализа. Особенно тщательному исследованию подвергся осуществлённый ими специфический тип разряда, получивший наименование «активированной» или «горячей» дуги. Этот вид разряда представляет собой дуговой разряд с наложенными на него быстро чередующимися искровыми импульсами. В ходе этих исследований, а также в ходе спектроскопических исследований, проведённых в Ленинграде (ГОИ) В. К. Прокофьевым, Н. С. Свентицким и др., в Томске (Сиб. физико-техн. институт) под руководством Н. А. Прилежаевой (О. П. Семёнова, В. И. Данилова, Н. К. Рубцова и др.), накоплен богатый материал по связи между внутренними и внешними параметрами разряда и яркостью излучения тех или иных спектральных линий, имеющий существенное значение для теории излучения газового разряда.

Родственный каналу искрового разряда конденсированный разряд через канал узкой трубки исследован А. Бабушкиным (также со спектральными целями). Установлены температура, степень ионизации и давление паров в таком канале.

Зажигание искрового разряда экспериментально исследовали М. А. Бак, А. С. Зингерман и Н. Н. Николаевская. Ими подтверждены и уточнены наблюдения, сделанные в своё время В. К. Лебединским, и установлено, что понижение и повышение напряжения зажигания искрового разряда при облучении катода зависит от геометрии разрядного промежутка и от интенсивности облучения.

VI. ИЗЛУЧЕНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА.
ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ГАЗАХ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Плазма — область разряда, представляющая собой наибольший интерес при разработке новых источников света. Количественное решение вопросов, связанных с излучением газового разряда вообще и, в частности, с излучением плазмы, стало возможным только после того, как были расшифрованы элементарные процессы в разряде и установлен ряд количественных соотношений между параметрами плазмы для отдельных конкретных случаев разряда. Такой материал был накоплен в чистых условиях опыта Б. Н. Клярфельдом. Им же совместно с Е. С. Плохоцким были произведены измерения светоотдачи положительного столба в парах ртути при различных условиях, а также произведены одновременные измерения градиента потенциала и интенсивности излучения положительного столба. Всё это послужило в руках В. А. Фабриканта исходным пунктом для создания теории, позволяющей производить расчёты не только относительной, но и абсолютной интенсивности отдельных спектральных линий в излучении газового разряда. Начав с простейшего случая, когда все элементарные процессы сводятся исключительно к прямому возбуждению атомов при неупругих соударениях с электронами, В. А. Фабрикант вывел формулы, связывающие интенсивность излучения, с одной стороны, с параметрами плазмы (концентрацией N_e и температурой электронов T_e), а с другой, — с атомными константами — начальным потенциалом возбуждения атома газа V_a и оптимальным потенциалом возбуждения V_m (оптимальная для возбуждения энергия соударяющегося с атомом электрона). Эти соотношения позволяют: 1) вычислить интенсивность излучения данной спектральной линии, зная T_e , N_e , V_a и V_m , 2) определить V_m , измерив при помощи метода зондов N_e и T_e и, наконец, 3) определить T_e и N_e , измерив интенсивность излучения и зная V_a и V_m . Последняя операция представляет собой пример применения оптических методов для исследования газового разряда. Эти методы становятся всё более и более возможными по мере развития теории излучения разряда и накопления количественных данных об атомных константах различных газов. Сравнение теории Фабриканта с опытом дало хорошие результаты при применении к разряду в парах натрия при низких давлениях, а также к относительной интенсивности резонансных линий ртути 2537 Å и 1850 Å. Постепенно усложняя задачу, В. А. Фабрикант перешёл к учёту вторичных процессов — ступенчатой ионизации, тушащих соударений второго рода и т. д. Учёт диффузии излучения позволил ему нарисовать общую картину возбуждения атомов в разряде низкого давления. Им проведено интересное исследование диффузии излучения при помощи люминесцирующих зондов. Он смог также более детально разобраться в процессах, имею-

щих место в люминесцентных лампах. При больших давлениях газа приёмы, дающие возможность подсчитать интенсивность отдельных спектральных линий, исходя из отдельных элементарных процессов, становятся уже неприменимыми. В то же время вся система плазмы (электроны, ионы, нейтральные атомы, фотоны) приближается к состоянию термического равновесия. Это даёт новые возможности и новые соотношения для теории излучения газового разряда. В этой области В. А. Фабрикантом также сделан ряд интересных выводов и поставлен ряд экспериментальных работ, в частности изучена и объяснена форма линий при излучении разряда в парах ртути высокого и сверхвысокого давления.

Разработка новых источников света, использующих тот или иной вид электрических разрядов в газах, велась параллельно в ВЭИ (А. М. Шемаев) и на Московском электроламповом заводе. На последнем были разработаны лампы тлеющего разряда, использующие так называемое тлеющее свечение: неоновые сигнальные лампы различных типов, приёмные лампы для телевидения с механической развёрткой при помощи диска Нипкова, точечные лампы для фототелеграфии. Там же разработаны высоковольтные лампы низкого давления, использующие свечение положительного столба тлеющего разряда и применяемые в качестве светящихся букв и трубок для вывесок рекламных надписей и силуэтов. В этих работах принимали участие С. В. Борисов, И. Д. Натонек, Н. И. Двукраев, М. И. Калугин и др. Д. А. Гоухбергом, С. В. Борисовым, Ходкевичем и В. П. Сасоровым разработан и доведён до массового производства оригинальный тип ртутных ламп высокого давления, использующих отштурованный дуговой разряд (лампы «Игар» для целей светокопировки), и несколько типов медицинских ртутных ламп в кварцевой оболочке. Особенностью тех и других ламп, отличающей их как от граничных ламп, так и от ламп ВЭИ, являются специально обработанные по методу, разработанному Д. А. Гоухбергом, оксидные катоды на вольфрамовом керне. Дальнейшей стадией в поисках источника света большой экономичности и хорошей цветности явились ртутные шаровые лампы сверхвысокого давления. Эти лампы отличаются чрезвычайно большой яркостью светящегося шнура разряда и находят применение как источники света для прожекторов и других проекционных установок. За последнее время Д. А. Гоухбергом построены лампы сверхвысокого давления, дающие свет, очень близкий к белому, и имеющие непрерывный спектр с медленно изменяющейся от одного его конца до другого интенсивностью. Эти лампы особенно пригодны для целей абсорбционной спектроскопии и во много раз превосходят по своим качествам и по сроку службы водородные лампы, применявшиеся ранее в этой области. Разработка всех этих ламп в лаборатории Московского электролампового завода сопровождалась там рядом экспериментальных исследований разряда при сверхвысоких давлениях. Этими исследованиями были установ-

лены соотношения между силой тока, градиентом потенциала, давлением, световым потоком и светоотдачей разряда.

На том же заводе освоено опытное производство люминесцентных ламп, действие которых основано на излучении разряда низкого давления в аргоне, содержащем пары ртути, и на фосфоресценции «люминофоров», нанесённых на внутренней стенке трубки лампы, под действием резонансного излучения ртути (линии $2537 \text{ \AA}$ и $1850 \text{ \AA}$). Базой для разработки методов изготовления соответствующих люминофоров послужили работы лаборатории академика С. И. Вавилова в Физическом институте АН СССР им. П. Н. Лебедева.

VII. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ГАЗАХ

Выше была указана та большая роль, которую играют в явлениях газового разряда неупругие столкновения второго рода. Экспериментально наличие неупругих соударений второго рода между возбуждёнными атомами ртути и свободными электронами было непосредственно доказано опытами А. И. Лейпунского и Г. Д. Латышева. Схема этих опытов напоминает схему известных опытов Франка и Герца по изучению возбуждения и ионизации атомов. Между анодом и второй сеткой прибора было наложено задерживающее электроны поле в $4,7$ вольта, что соответствовало самому низкому возбуждённому состоянию атомов ртути (метастабильный уровень) $6p^3P_0$. Свободные электроны эмиттировались раскалённым катодом и ускорялись полем первой сетки (потенциал V_1). При $V_1 > 4,7 \text{ в}$ электроны обладали энергией, достаточной для преодоления задерживающего поля, и в анодной цепи возникал ток. При $V_1 < 4,7 \text{ в}$ ток в анодной цепи возникал только при освещении разрядной трубки ртутным излучением. При поглощении этого излучения в пространстве между сетками возникали возбуждённые атомы ртути. Путём соударений второго рода их энергия передавалась свободным электронам и восполняла запас энергии, необходимый для преодоления электронами задерживающего потенциала между второй сеткой и анодом.

Другой элементарный процесс, детально исследованный советскими физиками, — это ионизация атомов натрия и других металлов при соударении с раскалённой вольфрамовой нитью.

Необходимость существования такого процесса не вытекает непосредственно из простых энергетических соображений, так как работа ионизации атома натрия больше чем работа выхода электрона из металлического вольфрама. Процесс становится мыслимым в свете соображений квантовой механики о конечной вероятности перехода электрона из атома натрия в зону электронов проводимости металлического вольфрама. Поэтому экспериментальное изучение этого явления, про-

ведённое Н. Д. Моргулисом в Физическом Институте АН УССР в широком интервале температур, представляет несомненный теоретический интерес. Аналогичная работа недавно проведена Г. А. Морозовым в отношении поверхностной ионизации бария на вольфраме. К этого же рода явлениям относится также рассеяние ионов калия на поверхности тантала, исследованное М. А. Еремеевым и М. В. Зубчаниновым.

Г. В. Спивак, А. А. Зайцев и Г. Захарьин провели исследование элементарного процесса аккомодации атомов ртути, а также атомов благородных газов при их соударении с поверхностью металла, как чистой, так и покрытой различного рода плёнками газа. При этом был установлен температурный ход коэффициента аккомодации, а также установлена связь между этим коэффициентом, молекулярным весом газа, частицы которого претерпевают обмен энергией с металлической поверхностью, и природой адсорбированного на этой поверхности газа.

С. Д. Гвоздоверу принадлежит работа по исследованию второй эмиссии электронов из металлической поверхности под действием положительных ионов — одного из основных элементарных процессов газового разряда на катоде. Исходя из результатов этого исследования, С. Д. Гвоздовер развил теорию катодного падения потенциала в разряде с накалившимся катодом, хорошо согласующуюся с экспериментальными данными, а затем совместно с В. Л. Булатом построил теорию газового разряда низкого давления с накалившимся катодом, находящимся в условиях «свободного» режима (т. е. при силе тока меньшей, чем ток насыщения эмиссии с катода, и поэтому не требующей усиленной бомбардировки катода положительными ионами).

С. Д. Гвоздовером дано также новое оригинальное решение вопроса о подсчёте скорости переносного движения электронов в положительном столбе под действием продольного градиента поля. В своём решении Гвоздовер исходит из того, что понятие свободного пробега электрона не имеет точного физического смысла без указания, о каком роде взаимодействия электрона с частицами газа идёт речь. Он показал, что при подсчёте подвижности электрона в положительном столбе необходимо пользоваться представлением о свободном пробеге, относящемся к процессу передачи электронами механического импульса частицам газа. Гвоздовер пришёл к выражению для подвижности, получившему всеобщее признание.

Существенное значение для разработки теории газового разряда имеет развитие квантовомеханической теории элементарных атомарных процессов на основе волновой механики. В отношении ступенчатых процессов возбуждения такого рода теория недавно разработана Б. М. Яворским.

Большое количество работ советских физиков по элементарным процессам в газовом разряде относится к области так называемой

«электроники», развитию которой в СССР посвящена упомянутая выше статья С. Ю. Лукьянова. Поэтому мы здесь касаться этих работ не будем.

Отдельным явлениям газового разряда посвящено несколько теоретических работ Я. И. Френкеля.

В работе, посвящённой природе шаровой молнии, Я. И. Френкель рассматривает последнюю как особую полуустойчивую коллоидальную заряженную систему. В работе «Об испускании электронов при бомбардировке катода положительными ионами» даётся новая своеобразная интерпретация этого явления. Я. И. Френкелем разобран также вопрос о связанных колебаниях плазмы и вакуумного резонатора, об автофокусировке электронного пучка при прохождении такого пучка через газ и ряд других.

Разработанная А. А. Власовым в течение последних лет общая теория плазмы, как статистической совокупности большого числа заряженных частиц, находящихся во взаимодействии не только на близких, но и на далёких расстояниях, даёт отправные пункты для расшифровки ряда явлений в плазме газового разряда. Так, эта теория проливает свет на причины большого времени и большого расстояния релаксации в газоразрядной плазме по отношению к нарушениям максвелловского распределения скоростей. Далее она приводит к обязательному наличию у плазмы «вибрационных свойств», и, тем самым, обобщает вопрос возникновения в плазме электромагнитных высокочастотных колебаний, наконец, в ней намечены пути для объяснения распада плазмы на отдельные светящиеся страты (так называемый слоистый положительный столб разряда).

VIII. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ГАЗАХ

Мы имеем здесь возможность лишь кратко упомянуть о большой работе по применению электрических разрядов, проведённой в СССР как в области разработки электровакуумных (газоразрядных) приборов, так и в области исследования специфических процессов, имеющих место в этих приборах. Сюда относится разработка ртутных выпрямителей на очень высокие напряжения и на очень большие мощности, проведённая Вологдиным.

В области вопросов, связанных с работой ртутных выпрямителей, работали И. Л. Каганов, Д. Уайт, Бабат, И. Кенин, Е. Петухов и др. Исследовано регулирование выпрямленного напряжения, решена задача управления током при помощи сеток, изучено гашение дуги при разрыве цепи, а также поведение управляемых выпрямителей в каскадных и многофазных схемах и зависимость обратного тока от различных условий и т. д.

Особый тип ионных преобразователей, основанных на действии магнитного поля на разряд, был предложен и исследован И. М. Ситниковым.

Вопросы, связанные с разработкой и с исследованием режима работы газотронов и тиратронов различной мощности, а также ряда других электровакуумных приборов, исследовались в лабораториях завода «Светлана». Результатом этих работ явилось оснащение нашей промышленности и наших радиостанций электровакуумными приборами, наличие которых позволило решить ряд существенных практических задач.

Другая область технического использования электрических разрядов в газах, нашедшая широкое развитие в СССР, это приёмы электросварки при помощи электрической дуги, впервые указанные в прошлом веке русскими электриками Н. Г. Славяновым и Н. Н. Бенардосом. В настоящее время дуговая сварка является в СССР основным технологическим процессом при изготовлении металлических конструкций.

Работы по изучению свойств сварочной дуги и протекающих в ней процессов и разработка новых усовершенствованных методов электрической сварки возглавляются в СССР академиком В. П. Никитиным.

Дальнейшим развитием метода Н. Г. Славянова явилось предложенное В. П. Никитиным разделение тепловых процессов подготовки основного и так называемого «присадочного» металла. В этом методе могут быть использованы различные сочетания электрической дуги и других источников тепла, как-то газовое пламя и токи высокой частоты. Из физических исследований, связанных с дуговой сваркой, укажем на проведённое В. Б. Никитиным, а затем В. П. Никитиным и И. Я. Рабиновичем исследование физических свойств электрической дуги в условиях сварки, позволившее установить зависимость устойчивости горения сварочной дуги от электрических параметров источника тока. Г. М. Тиходеев провёл исследование физико-химических процессов в сварочной дуге. Н. Н. Рыкалин дал теорию распространения тепла при электродуговой сварке, К. К. Хренов разработал методы электрической сварки и резки под водой, Е. О. Патон — скоростную автоматическую сварку под слоем флюса. Сюда же следует присоединить и многочисленные исследования специальных электрических машин для сварки, а также ряда технологических подробностей процесса сварки.

За последнее время в технике обработки металлических изделий большое значение приобрели методы искрового резания и сверления металлов, предложенные Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Эти методы допускают не менее точную геометрическую обработку, чем обычные механические методы резания, фрезеровки и сверления, и отличаются от них рядом преимуществ. Основаны эти методы на явлении «эрозии», представляющей собой специфическое разрушение анода при искровом разряде, ещё мало изученное с теоретической стороны.

Отдельно следует упомянуть о методах применения электрических разрядов в газах для активации химических реакций — работы С. С. Васильева, Н. И. Кобозева, Е. Н. Ерёмина, А. С. Предводителя, Н. Н. Нечаевой, Залогина, Н. Н. Некрасова, Л. Б. Шехтер, А. Г. Белянкина и др., а также об уже упомянутых в других разделах этой статьи применениях электрических разрядов в газах для очистки газов и сепарации материалов и для создания новых источников света.

Подытоживая достижения советской физики в области электрических явлений в газах, мы видим, что за истекшие тридцать лет в этой области в СССР сделано очень многое, как в направлении развития научного знания, так и в деле практических приложений полученных результатов.

Созданные в настоящее время в СССР благоприятные условия для развития творческой научной работы, несомненно, приведут в близком будущем к ещё большим успехам в области изучения электрических явлений в газах и к ещё более глубокому и плодотворному проникновению достигнутых здесь результатов в передовую технику нашей страны.
