

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ¹⁾

Дж. Слепьян, Вост. Питтсбург, Пенсильвания

Электроэнергетическая индустрия родилась в лаборатории из физических исследований Фарадея, и все ее достижения с момента ее возникновения представляют собой в большей или меньшей степени подтверждение фарадеевского закона электромагнитной индукции.

В отличие от механики и строительной техники электротехника не существовала до развития соответствующей области физики, и первыми электронинженерами были великие физики — Вебер, Кельвин и др. Общие принятые электрические единицы — вольт, ампер и т. д. — названы в честь знаменитых физиков. Изобретатель динамомашины, Гопкинсон, обращался к Кельвину за разъяснениями по поводу сил, действующих на проводник в пространстве между полюсами. Математик и физик-теоретик Пуанкаре¹ разобрал вопрос о магнитной энергии переменного тока.

Мне придется начать с определения и разграничения употребляемых мной понятий «физика» и «электроэнергетика».

Под термином «электроэнергетика» я буду понимать только получение и распределение электрической энергии и исключаю из рассмотрения использование ее, так как в противном случае мне пришлось бы иметь дело с чрезмерным избытком примеров решенных и нерешенных физических проблем. Я ограничусь вопросом о распределении электроэнергии низких частот, чтобы не вторгаться в область связи, оперирующей электроэнергией более высоких частот. Кроме того, я буду рассматривать только механический способ получения электроэнергии, т. е. исключу из рассмотрения батареи, фотоэлементы и другие источники электрической энергии низкой частоты.

Труднее будет определить термин «физика». Начиная с Фарадея, все, по существу, было физикой.

В основе электротехники лежит макроскопическое, феноменологическое рассмотрение электромагнитных явлений в неподвижных и движущихся средах. Основную роль в электротехнике играют уравнения поля, описывающие соотношения между различными электромагнитными векторами и скалярами, уравнение пондеромоторных сил, возникающих

в электромагнитном поле $F = eE + \frac{1}{c} [\mathbf{I}, \mathbf{B}]$, добавочные уравнения Максвелла, касающиеся различных электрических векторов в веществе, характеризующемся определенными константами, $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, $\mathbf{I} = \sigma \mathbf{E}$, и т. д. Поэтому я буду относить к электротехнике все те случаи, когда свойства вещества характеризуются такими его материальными константами, как проницаемость, проводимость и т. д., и только те случаи, где требуется более глубокое проникновение в природу электрического строения материи, я буду относить к области физики.

Могут возразить, что, например, изучая магнитные свойства железа

¹⁾ Journ. Applied Physics, 1937. Перевод А. Л. Комаровой.

инженер не может удовлетвориться простой описательной константой — проницаемостью, но должен также рассматривать насыщение и гистерезис. Однако я употребляю термин «константы вещества» в более общем смысле. Семейство кривых гистерезиса, с этой точки зрения, выражает магнитные свойства вещества таким же поверхностным (хотя и достаточно для большей части технических целей) образом, как например, уравнение $B = \mu H$. Только лишь вопросы, затрагивающие такие явления, как строение кристаллической решетки, спинэлектрона и т. п., я буду относить к «физике».

Я надеялся, что смогу оценить роль физики в электроэнергетической промышленности, просматривая содержание ведущих электротехнических журналов США и других стран за последние годы. Однако я нашел, что это был бы слишком большой труд. В самом деле, в одних только 53 и 54 томах Transactions of the American Institute of Electrical Engineers за 1934 и 1935 гг. я нашел 77 статей из области физики. Из них 13, написанных физиками, носили образательный характер и не описывали каких-либо новых экспериментальных работ. Примечательно, что так много места в электротехническом журнале отведено для того, чтобы держать читателей на уровне современных идей и достижений теоретической физики.

Содержание остальных 64 статей заставляет констатировать, что большая часть исследований, ведущихся в электротехнике, это физические исследования. Из этих 64 статей 8 посвящены электрическим свойствам вакуума, движению электронов и электронным приборам, 31 исследуют электрические свойства газов, применяющихся в электротехнике, 8 рассматривают электрические явления в диэлектриках (проводимость, условия пробоя в изолирующих жидкостях и твердых телах), 3 исследуют магнитные материалы, 14 изучают различные вопросы: образование пленок влаги на поверхности диэлектрика, поглощение звука, процессы, имеющие место при накаливании тел.

Хотя эти 2 тома Transactions могли и не быть типичными, можно все же с уверенностью сказать, что большая часть физических исследований в сегодняшней электротехнике касается разрядов в газах. Удивительно, что электрические свойства проводников не представлены в этих исследованиях. Новые достижения теории металлов и полупроводников еще, очевидно, не дошли до электронинженера.

Физик, работающий в электроэнергетической промышленности, применяет электронные лампы и газоразрядные трубки слабого тока для измерения больших токов, потребляемых в силовых установках, и для управления ими. Здесь можно упомянуть электронные регуляторы, контроллеры и другие приборы, получившие широкое распространение. Фотоэлементы, известные под названием «электрического глаза», применяются в индустрии во всевозможных счетных, сортировочных и контрольных операциях. Я не буду, однако, останавливаться на этих примерах, так как хочу, согласно изложенному ранее, оставаться в пределах области получения и распределения электрической энергии.

Рассмотрим ту область физики, к которой относилось наибольшее количество статей из числа просмотренных мной, т. е. электрические свойства газов, и исследуем, где и как с ними сталкивается инженер-энергетик.

Электрические разряды в газах фигурируют на всех участках энергетической системы, начиная с генератора и кончая сетью использования. В одних случаях они выступают в роли разрушающего фактора, вызывающего порчу электрической аппаратуры, в других, наоборот, они применяются как средства для достижения полезных целей. Чаше всего, обе эти роли — положительная и отрицательная — сопутствуют друг другу, — например молнии и предохранительный разряд в искровом промежутке громоотвода.

Рис. 1—6 показывают различные примеры применения электрических разрядов в газах в энергетической системе. На рис. 1 дана схема

большой энергетической системы. Генератор вращаемый паровой или водяной турбиной, дает переменный ток напряжением обычно около 15 kV. Это напряжение трансформируется до 22—287 kV для передачи энергии на большие расстояния. Затем идет распределительная система

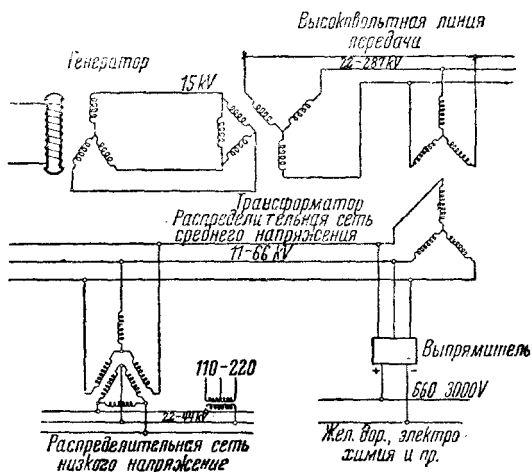


Рис. 1

несколько низшего напряжения (11—66 kV) для меньших расстояний, потом следует местная распределительная система при 2—4 kV, наконец, идет домовая или индустриальная сеть при 110—600 V.

Начнем с генератора (рис. 2). Здесь мы имеем возбудитель с коллектором и щетками. Как мы увидим дальше, при переключении имеет место разряд между щеткой и удаляющимся сегментом коллектора. Для работы генератора электрические свойства газов существенны по-толку, поскольку в изоляции генератора всегда есть воздушные про-

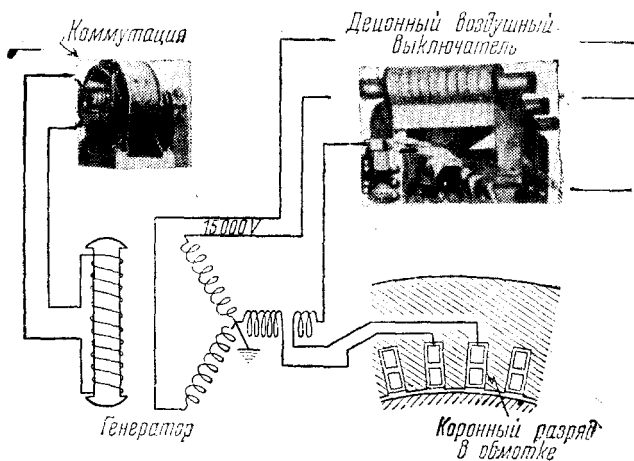


Рис. 2

межутки. Коронный разряд в малом воздушном промежутке между изолированной обмоткой и поверхностью металла — одна из наиболее трудно решаемых проблем, возникающих при конструировании генератора. Затем на чертеже показан мощный выключатель, функционирующий при помощи дуги между раздвигающимися электродами. В изображенном на чертеже выключателе образуется ряд коротких дуг с холодными катодами, возможность которых обсуждалась и была установлена К. Т. Комптоном², Х. Столтом³ и др.

Полученный ток трансформируется и поступает в высоковольтную передаточную систему (рис. 3), в которой используются изолирующие

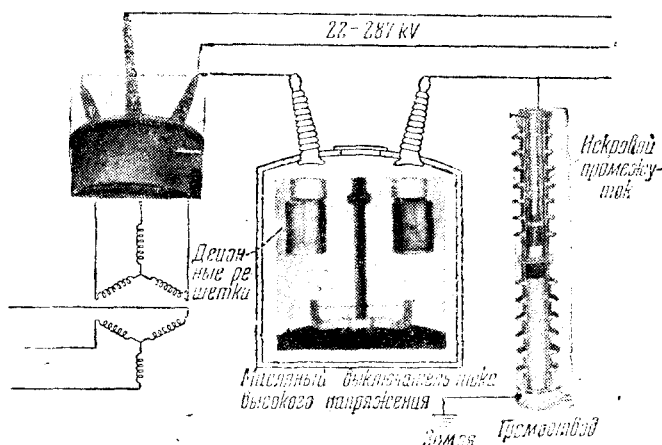


Рис. 3

свойства воздуха в его нормальном состоянии. Конструкция проходного изолятора трансформатора должна быть рассчитана таким образом, чтобы окружающий его воздух при нормальных условиях работы являлся изолятором, — при перенапряжении же пробой через воздух должен предотвратить от пробоя через изоляцию трансформатора, причем имеющий при этом место разряд должен идти не слишком близко к фарфоровому изолятору, чтобы последний не треснул от нагрева. Эти сложные проблемы искрового разряда у изоляторов до сих пор решались чисто эмпирически и нуждаются в хорошей физической теории.

В масляном выключателе дуга горит в пузырьке газа, образуемом при разложении масла. При работе с высоким напряжением условия образования пузырька должны быть таковы, чтобы даже короткая дуга была способна выполнить задачу прерывания тока при его ближайшем переходе через нуль после раздвижения контактов.

Линия передачи проходит в атмосферном воздухе, где иногда имеет место молния — мощный высоковольтный разряд. Прямым или индуктивным путем молния вызывает появление сильных токов в передаточной системе, если в последней не предусмотрено соответствующее защитное устройство. Существующие защитные устройства, к сожалению, еще не совершенны, и молния пока еще является основной причиной возникающих на линиях передачи аварий.

Предохранительный разряд в искровом промежутке громоотвода должен защитить линию от вредного действия молнии. По окончании молнии предохранительный разряд должен прекратиться. Основной физический прибор, которым пользуется инженер при изучении таких проблем, это катодная лампа, а основная концепция — физическая

теория ионизации в газах и, в частности, теория Тоунсенда о пробоих в газовых промежутках. Нужные для работы с высокими давлениями и высокими пробивными напряжениями изменения в теории Тоунсенда, необходимость которых была обнаружена впервые инженером Роговским⁴, были развиты им же в ряде блестящих и изящных исследований и разработаны в дальнейшем различными физиками.

Хотя состояние теории простого искрового промежутка в лабораторных условиях можно считать удовлетворительным, вольтамперная характеристика искрового промежутка в громоотводе все еще оставляет желать лучшего. Отклонение от идеальной предохранительной характеристики обусловлено непостоянством разрядного напряжения при атмосферных условиях. Причина этого непостоянства — в изменении изолирующих свойств фарфора под влиянием влажности.

На рис. 4 показан новый вид грозового предохранителя: защитная трубка, помещенная параллельно гирлянде подвесных изоляторов. Эта трубка благодаря своей дешевизне должна получить широкое распространение. Здесь искровой промежуток устроен следующим образом. Разряд происходит в фибровой трубке. Теплота, развивающаяся при разряде, разлагает часть фибры с выделением газа. Деионизирующее действие последнего, благодаря большому давлению и скорости, достаточно для гашения дуги при следующем прохождении тока через нуль. Основная трудность

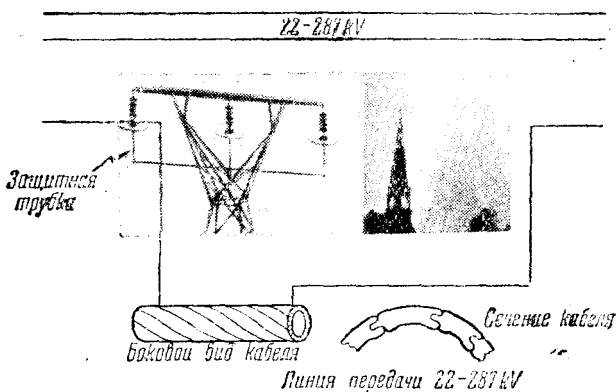


Рис. 4

здесь та, что трубка должна выдерживать высокие давления, развиваемые благодаря обильной генерации газа при сильных токах, и в то же время при слабых токах должна давать количество газа, достаточное для гашения дуги.

Поток энергии, возникающий благодаря магнитному и электрическому полям, создаваемым вокруг линии передачи, должен быть не слишком велик, чтобы воздух не потерял свои изолирующие свойства. Этим требованием принципиально определяется сечение проводника, а для экономии материала проводник делается полым. По экономическим требованиям условия работы линий близки к пределу, при котором возникает слабый коронный разряд. Коронный разряд у проводников изучен теоретически и экспериментально инженерами и физиками, особенно полная теория его была дана Хольмом⁵. Однако в случае проводников, подверженных окислению и выветриванию, мы еще находимся в стадии эмпиризма. Более детальное изучение разряда в этих условиях было бы очень желательно.

Исчерпывающее перечисление различных примеров применения газовых разрядов в энергетической системе было бы чересчур утомительным.

На рис. 4 показан кабель, применяемый в распределительной сети среднего напряжения. Чтобы устранить вредное действие ионизации в трещинах кабелей, они подвергаются тщательной пропитке и обра-

ботке в масле под давлением. Мы имеем мощные предохранители, в которых работа дуги улучшена благодаря генерации газа из фибровых стенок или пара у борно-кислотных патронovidных предохранителей. Мы имеем также ртутные дуговые выпрямители, преобразующие переменный ток в постоянный для нужд электрохимии, для железнодорожных нужд и т. п. В распределительной низковольтной системе на рис. 5 мы видим трансформатор с вмонтированной предохранительной трубкой, в принципе сходной с предохранительной трубкой в цепи высокого напряжения. В низковольтной утилизационной сети (рис. 6) мы имеем такие примеры, как использование дуги в огромном числе звонковых кнопок и использование обычных выключателей осветительной сети. При помощи электрических разрядов осуществляются также переключения, имеющие громадное распространение в моторах.

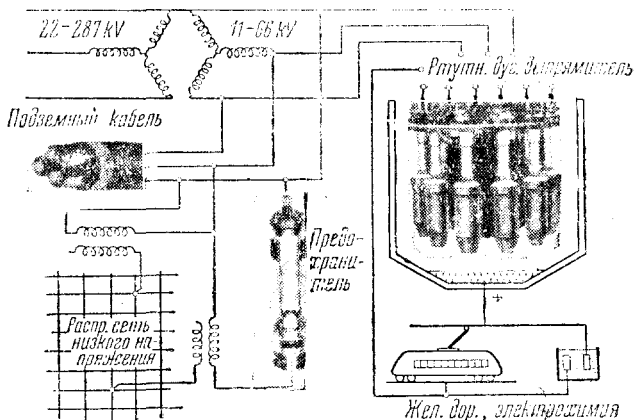


Рис. 5

Разбирая примеры использования разрядов в газах в энергетической системе, мы легко найдем проблемы, общие для них. Мы видим во всех этих случаях проблему возникновения и проблему гашения полезного разряда. Для сети переменного тока под гашением полезного разряда обычно понимают предотвращение возобновления разряда после того, как ток перейдет через нуль. Обсудим значение физической теории для решения таких проблем и постараемся также указать случаи, где она недостаточно совершенна или совсем не разработана.

Возникновение разряда при высоковольтном пробое уже обсуждалось при рассмотрении искрового промежутка в предохранителе. Здесь разряд возникает по всей длине. В других приложениях чаще первоначально возникает катодная часть разряда, а затем самопроизвольно следует разряд в остальном пространстве. Так, в вакуумных газоразрядных трубках, например в тиратроне, благодаря наличию специально подогреваемого тока катода при приложении достаточно высокого напряжения к аноду и сетке в приборе имеются электронные образования. Теория Лэнгмюра⁶ об образовании плазмы удовлетворительно объясняет поведение разряда в этом случае, но количественно она разработана только для наиболее простой формы и расположения электродов. В обычных ртутных дуговых выпрямителях катод постоянно поддерживается в возбужденном состоянии при помощи дополнительного анода.

В большинстве описываемых мной устройств обычно не представляет трудности поддерживать разряд после того, как он возник, но в

разрядных трубках с малым давлением газа существует предел, через который не может перешагнуть сила тока. Когда это предельное значение силы тока, величина которого зависит от давления, достигнуто, наступает неустойчивое состояние, при котором разряд беспорядочно прерывается и возобновляется, причем в индукционной цепи возникает высокое напряжение. Указанное явление имеет большое практическое значение, поскольку оно ограничивает мощность ртутных дуговых выпрямителей. Лэнгмюр и Мотт-Смис⁷, Халл и Браун⁸ связали это явление со степенью ионизации газа. Я нахожу возможным объяснить его удалением газа из трубки путем одностороннего движения положительных ионов.

В ртутных дуговых лампах типа игнайatron, имеющих теперь применение в технике, находит интересное приложение математическая

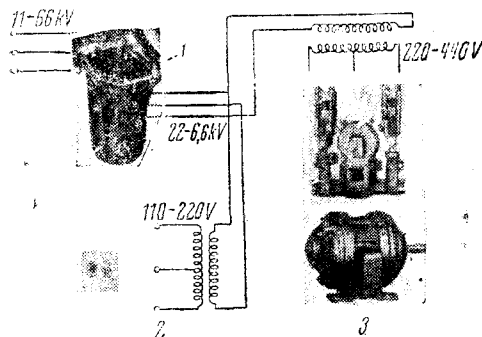


Рис. 6

1 — деионный промежуток, 2 — домовая сеть, 3 — промышленная сеть

теория установившегося потока электричества. Погружая в ртуть неподвижный брусок из материала с высоким сопротивлением, можно вызвать в месте соприкосновения концентрацию электрического поля и электрического тока подобно тому, как это имеет место при раздвижении контактов, и с аналогичным результатом, т. е. с образованием катодного пятна дуги. В этом типе трубок предельное значение тока, при котором наступает неустойчивость, пока не наблюдалось, очевидно, благодаря тому, что анод находится непосредственно на

пути струи паров ртути, идущей от катодного пятна.

Инженером Танбергом⁹ было замечено, что пары, распространяющиеся от катодного пятна при низких давлениях, обладают необычно большим механическим импульсом и энергией, соответствующей напряжению свыше ста вольт. Тонкс¹⁰ высказал ряд сомнений в реальности существования быстрого потока Танберга, а Мезон и Беркей¹¹, наоборот, подтвердили мнение Танберга. Риш и Луди¹² дали теорию, основанную на предположении о многократной ионизации атомов.

Вполне очевидно, что от инженера требуется хорошее знание физической теории катода, знакомство с термоионной и холодной электронной эмиссией, движением электронов и ионов и т. д.

Возникновение разряда в переключателях и выключателях происходит настолько легко при простом раздвижении контактов, и проблема гашения разряда часто настолько трудна, что на полезное действие разряда не обращают внимания и дугу рассматривают как зло, которое надо избежать. Однако согласно закону Фарадея, внезапное сведение тока до нуля в момент раздвижения контактов привело бы к образованию гибельного высокого напряжения. Только в случае, когда момент раздвижения контактов настолько тесно синхронизирован с моментом прохождения переменного тока через нуль, что электростатическая емкость системы может поглотить мгновенную магнитную энергию, опасное высокое напряжение не возникает. Но обычно эта электростатическая емкость так мала, что требуется неосуществимая точность синхронизации, и только разряд в газе избавляет инженера от этой неприятности. Благодаря разряду появляется возможность раздвижения контактов при любом значении тока; дуга самопроизвольно обра-

зуется и вызывает прерывание тока в момент, когда ток снова достигнет нуля.

Были сделаны попытки прерывания тока без разряда. Вместо разделяющихся контактов вводилось сопротивление, непрерывно нарастающее до практически бесконечного значения. Примером такого сопротивления фактически является щетка коммутатора, поскольку поверхность соприкосновения щетки и сегмента, а следовательно, и обратное значение сопротивления, введенного в контур, приближается к нулю непрерывно во время движения сегмента относительно щетки. Анализ показывает¹³, однако, что при заранее выбранном ходе изменения сопротивления все же имеется необходимость чрезвычайно прецизионной синхронизации во избежание опасного перенапряжения. Поскольку практически синхронизация всегда несовершенна, применению разряда принадлежит все же первенство. При хорошей, хотя и не идеальной, синхронизации разрядный ток может быть очень мал, так что происходит тихий разряд, неопасный и могущий легко пройти незамеченным.

Гашение полезного разряда в сети переменного тока обычно сводится к проблеме предотвращения возобновления разряда после прохождения тока через нуль. Это может быть выполнено посредством подбора таких условий, при которых положительный столб или катодное пятно или катодное свечение не может самопроизвольно образоваться вновь. В выключателях для высокого напряжения играет роль положительный столб. Применяются различные средства для того, чтобы положительный столб имел при нулевом токе такое малое сечение, чтобы температура его и степень ионизации упали до значения, при котором восстановление столба в следующий полупериод тока невозможно. Здесь ведущую роль играет теория термической ионизации положительного столба К. Т. Комптона¹⁴. Недавно опубликованная превосходная статья Кессельринга и Коппельмана показывает, до какой степени инженерам необходимо разобраться в сложной физике дуг, работающих на большом токе.

Средства, применяемые для достижения малого сечения положительного столба, различны. Можно упомянуть барьер, задерживающий магнитное поле, в выключателях с деионизационной решеткой Вестингауза, движение масла под давлением в выключателях с масляным дутьем. Всеобщей электрической компании, струю газа в прерывателях выключательного типа и выключатели с газовой струей, употребляемые в Европе.

В выключателях для низкого напряжения в выключателях деионизационного типа для более высокого напряжения создаются условия, при которых образование катодного столба невозможно. При перемене полюсов отсутствует термоионная активность нового катода, разряд должен быть тлеющим, по крайней мере вначале, и, если имеющееся напряжение недостаточно для поддержания катодного свечения, разряд не образуется вновь. Однако в устойчивых дугах при больших токах напряжение, нужное для возобновления разряда, значительно ниже минимального напряжения зажигания разряда в обычных условиях, и для прерывания приходится прибегнуть к помощи положительного столба. Теория этого эффекта еще не разработана. В выключателях деионизационного типа дуга быстро движется у поверхностей анода и катода, и даже при очень больших токах уменьшение напряжения обратного зажигания не имеет места.

В ртутных дуговых выпрямителях, игнайтронах, тиратронах, трубках с тлеющим разрядом и вообще в газоразрядных трубках для гашения разряда в момент перехода тока через нуль необходимо отсутствие катодного пятна и наличие напряжения меньшего, чем нужно для поддержания тлеющего разряда.

При низком давлении газа увеличивается напряжение, необходимое для поддержания тлеющего разряда, и таким образом становится возможной работа с относительно высоким напряжением. Однако во всех этих приборах иногда имеет место явление, для объяснения которого еще не существует, по моему мнению, удовлетворительной теории.

Именно, несмотря на отсутствие условий, которые существующая теория считает обычно необходимыми, катодное пятно все же образуется после перехода тока через нуль и вызывает короткое замыкание. Статистическая частота этих случаев «обратного зажигания» говорит о том, что какие-то молекулярные агрегаты, может быть оторванные от загрязнений на поверхности электродов, или частицы, находящиеся в броуновском движении, проходят через газ и приходят в соприкосновение с анодом. Однако детальной теории обратного зажигания, вызванного наличием таких агрегатов не существует. Такие случаи обратного зажигания при напряжении, превышающем 30—40 kV, очень часты, поэтому проблема трубок этого типа для такого высокого напряжения еще не разрешена. Для осуществления часто дискутируемой задачи передачи постоянного тока высокого напряжения необходимо ждать разрешения именно этой проблемы.

Возможно, что применение положительного столба или дугового разряда при повышенном давлении, предложенное Марксом¹⁵ в его выпрямителе с газовой струей, окажется наилучшим решением.

Неизвестно, однако, исключены ли в таких выпрямителях явления, аналогичные обратному зажиганию. Если дуга в выключателе с газовой струей случайно загорится вновь после прохождения тока через нуль, мы будем иметь ток в течение одного добавочного полупериода, что совершенно несущественно и обычно ускользает от внимания оператора. Но в выпрямителе обратное зажигание дуги равносильно короткому замыканию. Одно такое ненормальное обратное зажигание за миллион циклов уже недопустимо.

Я надеюсь, что смог наглядно показать проявление явлений, составляющих предмет одной из глав физики — электрических явлений в газах — в каждом участке функционирующей энергетической системы. Я надеюсь, что сумел также показать, как незаменима разработанная физиками теория для решения родственных технических проблем и как инженеры, ставшие физиками, в свою очередь развили теорию. Я надеюсь также, что приводя примеры, где несовершенство теории или ее полное отсутствие затрудняет конструкцию и характеристику прибора, я показал своевременность дальнейшей работы физика и инженера-физика в электроэнергетической промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Poincaré, *Ecl. Electr.*, **50**, 293, 1907.
2. K. T. Compton, *Phys. Rev.*, **21**, 266, 1923.
3. H. Stolt, *Z. Physik*, **262**, 95, 1924; *Ann. d. Physik*, **74**, 80, 1924.
4. W. Rogowski, *Beg. Arch. Electrotechn.*, **16**, 496, 1926.
5. R. Holm, *Wiss. Veröff. Siemens-Konzerns*, **IV**, 1, 14, 1925.
6. I. Langmuir, *J. Frankl. Inst.*, **214**, 275, 1932.
7. I. Langmuir a. Mott-Smith, *Gen. Elec. Rev.*, **27**, 770, 1924.
8. R. W. Hull a. H. D. Brown, *Trans. A. I. E. E.*, **50**, 744, 1931.
9. R. Tanberg, *Phys. Rev.*, **35**, 1080, 1930.
10. I. Tonks, *Phys. Rev.*, **46**, 278, 1934.
11. R. C. Mason a. W. E. Berkeley, *Phys. Rev.*, **38**, 943, 1931.
12. R. Risch u. F. Ludi, *Z. Physik*, **75**, 812, 1932.
13. J. Slepian, *J. Frankl. Inst.*, **214**, 413, 1932.
14. K. T. Compton, *Phys. Rev.*, **21**, 286, 1923.
15. E. Marx, *E. T. Z.*, **53**, 737, 1932.