

ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫХ
ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ*Л. В. Мысовский. Ленинград*

Энергия α -, β - и γ -лучей радиоактивных элементов достигает величины в несколько миллионов вольт на электрон. Поэтому вполне естественно, что экспериментаторы-физики в своем стремлении получить искусственным путем радиоактивные излучения прежде всего стремились для достижения этой цели получить лабораторными способами возможно высокие потенциалы. Наиболее подходящим прибором для этой цели до весьма недавнего времени можно было считать трансформатор Тесла, работающий на ударном возбуждении. Условия работы такого трансформатора подробно рассмотрены мною в статье: „Лабораторный метод получения высоких потенциалов“ *. В этой же статье описывается трансформатор Тесла, при помощи которого американским физикам Брейту, Тюве и Далю, удалось получить напряжение в 5 млн. вольт. При этом длина вторичной спирали трансформатора была всего в 1 м при диаметре в 8 см. Можно было идти и значительно дальше по пути повышения напряжения. Необходимо было лишь разрешить вопросы о том, как удерживать эти высокие потенциалы и как ввести их в вакуумные трубки. Несмотря, однако, на все преимущества трансформатора Тесла, как источника высокого напряжения, у него имеются и существенные недостатки. Прежде всего трансформатор Тесла, как и всякий другой, дает переменную электродвижущую силу, и следовательно, если его применить для ускорения ионов, то приходится говорить уже не о максимальной электродвижущей силе, а лишь об эффективном ее значении.

* Ссылки на литературу в конце статьи.

Кроме того, промежутки времени, в течение которого электродвижущая сила действует на данном направлении, очень мал (токи высокой частоты).

Для того чтобы получить постоянный потенциал, а не переменный и было предложено несколько новых более или менее оригинальных способов. Прежде чем перейти, однако, к описанию последних работ в этой области мы остановимся вкратце еще на одном из недостатков трансформатора Тесла. Если говорить не только о получении высокого потенциала и об ускорении ионов, но также иметь в виду использовать эти ускоренные ионы для опытов по расщеплению атомов, то придется считаться еще с одним отрицательным свойством трансформатора Тесла. В упомянутой уже нами выше статье¹ были подробно выяснены причины, благодаря которым трансформатор Тесла должен работать на ударном возбуждении. Но при ударном возбуждении сила ионного тока будет сравнительно невелика. Между тем из опытов с расщеплением атома α -лучами нам уже достаточно хорошо известно, что вероятность попадания α -частицы в ядро атома очень мала, и потому требуется большое количество α -частиц, чтобы вызвать расщепление заметного количества атомов. Если же вместо того, чтобы воспользоваться каким-либо радиоактивным веществом, взять источником быстрых ионов высоковольтную установку, то очевидно, что эффект расщепления должен быть усилен во много раз, чтобы его можно было заметить сравнительно простыми приборами, помещенными по соседству с проводниками, заряженными до высоких потенциалов. С другой стороны, те же экспериментальные данные о расщеплении атомов элементов α -частицами показали, что вовсе нет необходимости стремиться к очень высоким потенциалам.

В случае H -частиц — протонов потенциалы, достаточные для расщепления, могут быть еще меньше, так как протону гораздо легче проникнуть внутрь ядра атома, чем тяжелой α -частице с двумя элементарными зарядами. Вот почему в течение последних двух лет внимание экспериментаторов было направлено, главным образом, на получение мощного и постоянного пучка протонов.

ПОЛУЧЕНИЕ БЫСТРЫХ ПРОТОНОВ ПРИ ПОМОЩИ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА

Несмотря на вышеперечисленные недостатки трансформатора Тесла, Тюве, Хавстеду и Далю² все же удалось при помощи своего трансформатора получить быстрые протоны в количестве, достаточном для того, чтобы не только констатировать факт их появления, но и произвести некоторые измерения. Установка и разрядная трубка были уже описаны нами в вышецитированной статье, к которой мы и отсылаем желающих подробно ознакомиться с экспериментальными деталями. Тюве, Хевстед и Даль в письме, опубликованном в *Phys. Review*², также полностью ссылаются на свои первоначальные работы с трансформатором Тесла и описывают лишь видоизменения в трубке, послужившие для наблюдения протонов. Самые наблюдения велись двумя способами: 1) по методу томсоновских парабол; 2) при помощи камеры Вильсона. Наблюдая на флюоресцирующем экране след пучка протонов, отклоненного магнитным и электрическим полем, авторам удалось констатировать, что в пучке встречались как H^+ , так и H_2^+ , прошедшие поле в 1 млн. вольт. Попытки сфотографировать параболы не увенчались успехом, так как не только след пучка, но остальные части экрана довольно сильно флюоресцировали под влиянием рассеянных электронов и попадавших на экран световых лучей. Что касается до источника протонов, то, по мнению авторов, протоны получались из водорода, оклюдированного электродами, а также из оставшегося после откачки в разрядной трубке газа.

Применение камеры Вильсона для наблюдения следов протонов в пересыщенном парами газе вначале оказалось также не особенно удачным. Для того чтобы протоны могли из трубки попадать в камеру, и в той и в другой были проделаны отверстия, разделенные тонким листочком слюды. Так как камера находилась в непосредственном соседстве с разрядной трубкой, то в нее через слюдяное окно попадали не только протоны, но и быстрые электроны (не следует забывать, что трансформатор Тесла дает переменную

электродвижущую силу и, следовательно, в разрядной трубке ускорению подвергались ионы обоих знаков). Когда при помощи магнитного поля электроны были отклонены от слюдяного окна, то оказалось, что остались еще рентгеновые лучи, которые в большом количестве проникали из разрядной трубки в камеру Вильсона и вызывали в ней интенсивную ионизацию. На фоне тумана, образованного рентгеновыми лучами, уже не удавалось проследить с достаточной определенностью следы отдельных протонов. С целью увеличить число протонов была сделана попытка получать их по рецепту Демстера-Рамзауера из лития, бомбардируемого электронами под напряжением в 50 V. Однако количество протонов, доходивших из этого источника до слюдяного окна, было так мало, что от этого видоизменения пришлось отказаться. Вместо усовершенствования трубки Тюве, Хевстед и Брейт² решили тщательнее защитить камеру Вильсона от рентгеновых лучей. Для этой цели они поместили между камерой и трубкой толстый слой поглощающего вещества, оставив свободным проход через окно для протонов. Для отклонения электронов и медленных ионов попрежнему применялось магнитное поле. В этих условиях установка дала уже вполне определенные результаты. Так как слюда в окошке имела задерживающую способность 1,8 см воздуха, то протоны попадали в камеру Вильсона уже несколько ослабленными, но все же следы их выступали вполне отчетливо. Число протонов, наблюдаемое в камере, для каждого расширения было различно и менялось от 1 до 200. При большом количестве протонов (около 200) уже нельзя было различать отдельных следов, но общий характер пучка не оставлял сомнений в присутствии протонов. Так как протоны двигались под влиянием переменной электродвижущей силы и, кроме того, начинали свое движение в разных частях трубки, то и скорости протонов, вошедших в камеру, были различны. Для большей определенности измерений брались протоны с максимальным пробегом. Максимальный пробег протона в воздухе, приведенный к нормальным условиям температуры и давления, оказался равным 2,8 см, что достаточно хорошо

соответствует приложенному полю в 1 млн. вольт. Нужно, однако, заметить, что и сами авторы, повидимому, считают полученные ими результаты не особенно надежными. В конце своего письма они указывают, что с трансформатором Тесла и с их трубкой очень трудно получить точные количественные данные. В следующей своей работе Тюве, Хавстед и Даль собираются получать быстрые протоны и произвести более точные измерения, воспользовавшись вместо трансформатора Тесла электростатическим генератором ван-де-Граафа. О том, что собой представляет этот генератор и каковы его преимущества, мы скажем несколько слов в дальнейшем изложении.

ГРОВОНЫЕ РАЗРЯДЫ КАК ИСТОЧНИКИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Мысль воспользоваться грозовыми разрядами для получения большой разности потенциалов пришла немецким физикам, Брашу и Ланге, еще в 1927 г. В то время еще не были опубликованы работы о получении высокого потенциала при помощи трансформатора Тесла, не было и работ с другими типами высоковольтных генераторов, за исключением чисто технических. Так как Браш и Ланге ставили себе целью получение ионов с кинетической энергией в несколько миллионов вольт, то им казалось, что можно значительно сократить работу, воспользовавшись уже готовым громадным потенциалом, имеющимся в природе. Нужно было только отвести этот потенциал в приспособленную для этой цели лабораторию и присоединить к разрядной трубке. Браш и Ланге указывают, что обычно, в зависимости от времени года, падение потенциала в атмосфере колеблется от 200 до 400 *вольт/м*. Во время грозы, однако, градиент может увеличиться больше чем в тысячу раз. Таким образом уже на высоте каких-нибудь 100 м с уверенностью можно было ожидать потенциалы, по крайней мере, порядка 10 млн. вольт. Основной вопрос, который надлежало разрешить прежде всего, — это выбор подходящей местности. Не останавливаясь на различных условиях, которым должна была удовлетворять эта мест-

ность, мы здесь укажем только, что после совещания с метеорологами, Браш и Ланге окончательно обосновались на Монте Женерозо, близ Лугано. Мы не будем также останавливаться на отдельных стадиях работы и тех трудностях, которые пришлось преодолевать при монтаже этой сверх-высоковольтной установки в необычных природных условиях*, а опишем лишь окончательную установку 3, на которой удалось получить наиболее мощные разряды. Схематически эта установка изображена на рис. 1, где d изображает в перспективе антенну, укрепленную между двумя вершинами Монте Женерозо, находившимися друг

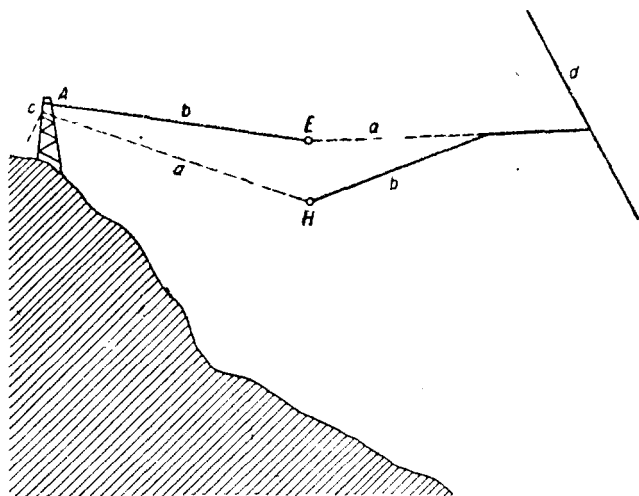


Рис. 1.

от друга на расстоянии 660 м. Чтобы избежать образования короны, на отводящем напряжение тросе b были насажены полные бусы. Каждая бусина представляла собой полный цилиндр из оцинкованной жести, длиной около 2 м. На концах цилиндров находились латунные полушария, в центре которых были просверлены отверстия для про-

* Как сообщают авторы, вначале работа была предпринята тремя физиками: Арно Брашем, Фридом Ланге и Куртом Урбаном. Летом 1923 г. во время работ на Монте Женерозо с Куртом Урбаном произошел несчастный случай, повлекший за собой смерть этого сотрудника.

девания троса. Диаметры бус по мере понижения троса к земле постепенно увеличивались. В верхних частях диаметр цилиндров был равен 2 см, в частях проводки, ближайших к земле, доходил до 90 см. Монтаж последних наиболее крупных бус изображен на рис. 2. Обратимся теперь вновь к рис. 1.

Буквой *H* обозначена на нем последняя бусина, служившая одновременно и полюсом высокого напряжения. Часть троса *a* предназначалась только для поддержки на

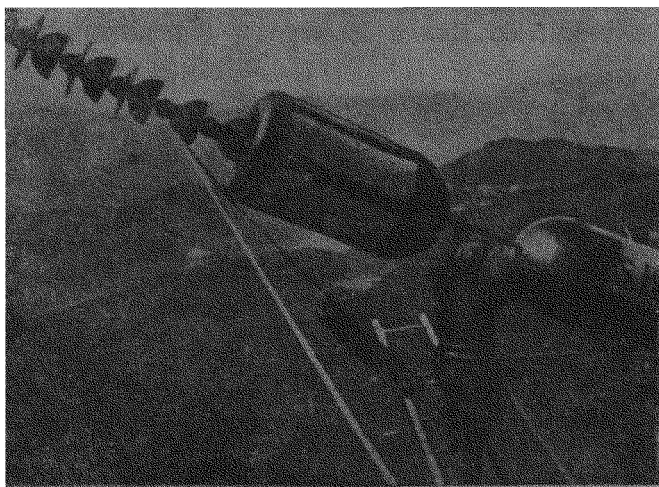


Рис. 2.

определенной высоте полюса *H* и потому должна была быть достаточно хорошо изолирована. Двойная гирлянда изоляторов, непосредственно примыкающая к последним бусам, изображена на рис. 3. Число этих изоляторов приходилось увеличивать по мере перехода к наиболее высоким потенциалам. Однако, когда дошли до 120 штук, то антенна перестала выдерживать и в последних опытах небольшие гирлянды были оставлены лишь в местах, наиболее близких к месту разряда, в остальных же они были заменены непромокаемым льняным канатом. Второй полюс *E* (рис. 1), был подвешен аналогичным образом несколько выше на двух канатах, изолирующем *a* и проводящем *b*. Через

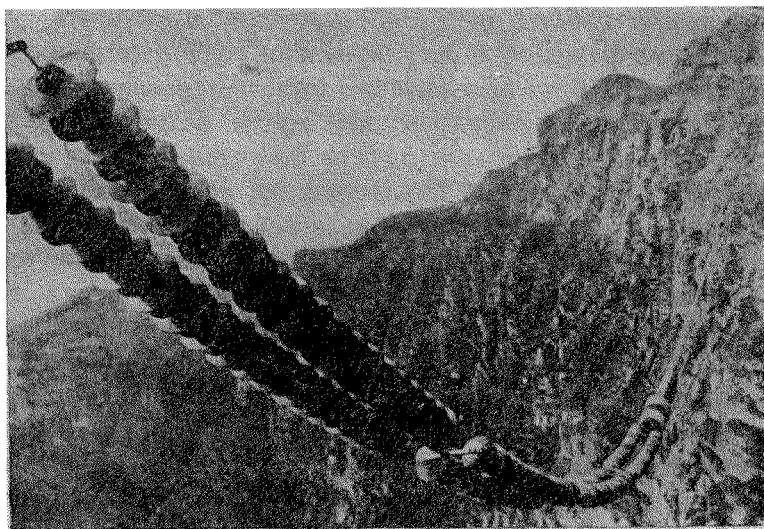


Рис. 3.

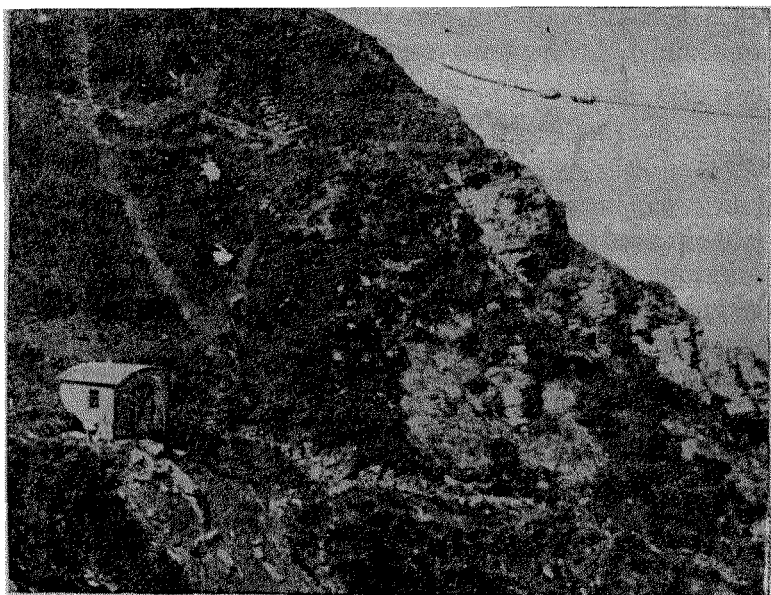


Рис. 4.

проводящий канат в полюс E был соединен с землей. Для наблюдения разрядов и регулирования величины искрового промежутка HE , вблизи антенны было построено специальное помещение из гофрированной жести размером $4 \times 3 \times 2$ м³ (рис. 4). Пол в этом домике был сделан также металлическим. Поэтому весь корпус домика можно было отвести к земле при помощи специального кабеля, служащего для отвода ударов молнии. Находясь в этом домике, можно было спокойно наблюдать разряды между полюсами и изменять при помощи натяжения каната величину искрового промежутка. Минимальное расстояние между полюсами было 2 м, максимальное 18 м. По мнению Браш и Ланге разряд между полюсами, находящимися на расстоянии 18 см, соответствовал разности потенциалов от 14 до 16 млн. вольт. Грозовые потенциалы к разряду в вакуумной трубке не применялись, и на описанные здесь опыты приходится смотреть, как на продолжение исследований Франклина, сделанные более тщательно и с современными техническими средствами. Для получения быстрых ионов Браш и Ланге воспользовались другой, уже чисто лабораторной установкой, к описанию которой мы теперь и переходим.

УДАРНЫЙ ГЕНЕРАТОР

Ударный генератор по условиям работы и по коэффициенту напоминает трансформатор Тесла, работающий на ударном возбуждении. При ударном возбуждении трансформатора Тесла энергия W , запасенная в первичном контуре с емкостью C_1 , переходит при наиболее благоприятных условиях ¹ почти целиком во вторичный контур с емкостью C_2 . Следовательно, мы имеем равенство:

$$W = \frac{C_1 V_1^2}{2} = \frac{C_2 V_2^2}{2}.$$

Отсюда максимальный достижимый коэффициент трансформации:

$$s = \frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}.$$

При работе ударного генератора энергия W распределяется сначала равномерно между конденсаторами емкостью C_1 , соединенными параллельно, а затем та же энергия распределяется между теми же конденсаторами, но соединенными последовательно. Написав равенство:

$$W = nC \cdot \frac{V_1^2}{2} = \frac{C}{n} \cdot \frac{V_2^2}{2},$$

и полагая

$$nC = C_1 \text{ и } C/n = C_2, \text{ получим } C_1 \cdot \frac{V_1^2}{2} = C_2 \cdot \frac{V_2^2}{2},$$

максимальный (без учета потерь) коэффициент трансформации будет в этом случае равен:

$$S = \frac{V_2}{V_1} = n,$$

или, введя

$$C_1 \text{ и } C_2, \text{ найдем } S = \frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}},$$

т. е. тот же коэффициент трансформации, что и у трансформатора Тесла.

В качестве примера Браш и Ланге приводят установку (рис. 5) в Физическом институте в Берлине. Эта установка состоит из 20 стеклянных пластин-конденсаторов, емкостью в 30 000 с.м. каждый. Конденсаторы соединены попарно в десять элементов, которые затем при помощи искровых промежутков переключаются с параллельного соединения на последовательное. В результате потенциал повышается с 90 000 вольт до 900 000. Схема переключения конденсаторов представлена на рис. 6. Этот рисунок схематически изображает высоковольтный ударный генератор АЕГ на 2,4 млн. вольт. Емкость его при последовательном соединении конденсаторов через искровые промежутки равна 4000 с.м. Продолжительность разряда от 10^4 до 10^{-4} сек. при напряжении в $2,4 \cdot 10^6$ V и при силе тока за этот промежуток времени около 1000 А. Браш и Ланге сообщают, что такого же типа генератор строится

в Берлинском физическом институте на $7 \cdot 10^5$ В. Этот генератор состоит из батареи конденсаторов, погруженной в железный бак, наполненный маслом. Давление внутри бака может быть доведено до 6 ат (для повышения изоли-

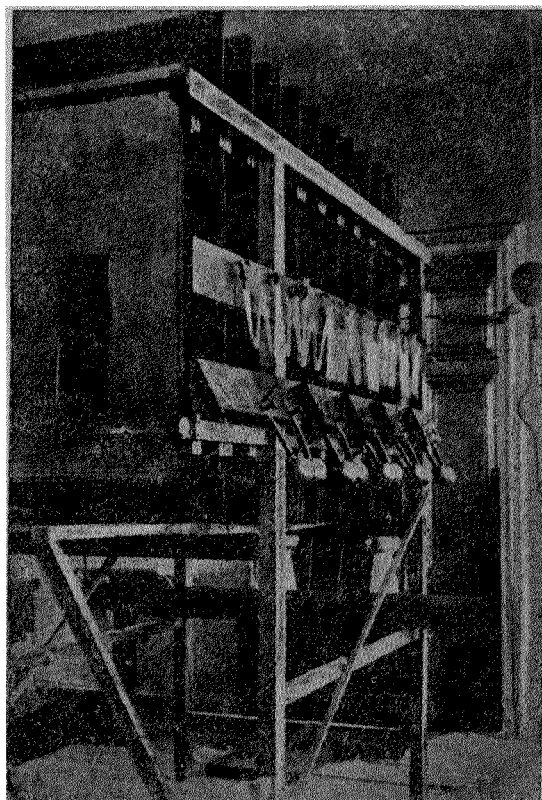


Рис. 5.

рующей способности масла). 70 искровых разрядников находятся внутри бака, но их полюса не соприкасаются с маслом, а помещаются в особых маленьких камерах со сжатым воздухом. Наконечники разрядников пришлось поместить в воздухе потому, что в масле трудно добиться одновременной работы всех искровых промежутков. Кроме того, меняя давление воздуха в камере, можно регулировать

величину разрядного потенциала. Остановимся теперь на защите окружающих помещений от влияния разрядов ударного генератора. Мощные разряды высоковольтных установок вызывают в окружающих проводниках появление волн, под действием которых перегорают лампы накаливания, предохранители и даже провода. Защититься от этого неприятного явления довольно легко. По словам Браш и Ланге достаточно было оклеить комнату, в которой находился ударный генератор, алюминиевой фольгой, толщи-

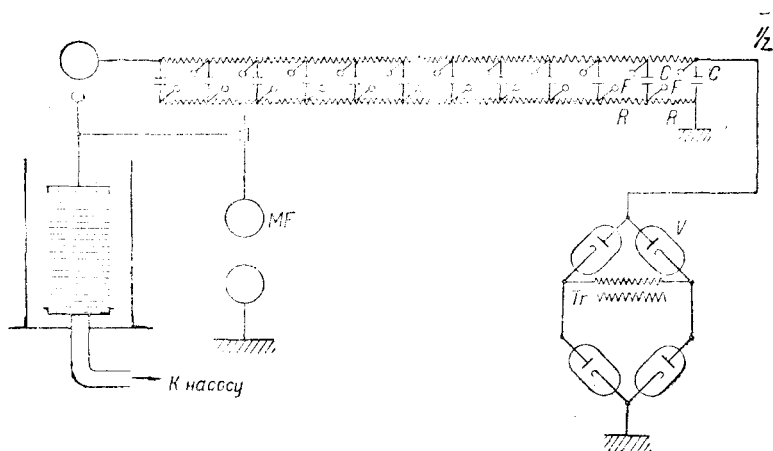


Рис. 6.

ной в $1/100$ мм, чтобы все эти явления в соседних помещениях прекратились. Заканчивая описание ударного генератора, укажем, что у нас в СССР также имеются уже собранные ударные генераторы, по величине, по напряжению аналогичные генератору Берлинского физического института. Например, такой генератор находится в Физическом институте Ленинградского университета, в лаборатории проф. П. И. Лукирского. Работа этого генератора вызывала те же неприятные последствия в смежных лабораториях, а потому помещение, в котором находится генератор, также пришлось выложить изнутри металлическими листками. Все сказанное о защите ударного генератора относится, конечно, и к другим высоковольтным установкам, например, к трансформатору Тесла.

Пластичатая разрядная трубка Браш и Ланге

Имея в своем распоряжении высокие потенциалы, Браш и Ланге занялись конструированием разрядной трубки. Как известно, технические медицинские трубки для просвечивания лучами Рентгена в лучшем случае выдерживают 300 000 В. Браш и Ланге прикладывали к таким трубкам, погруженным в масло, постепенно повышающиеся потенциалы, но не добились определенных результатов. В некоторых случаях потенциал удавалось поднять до 1 млн.

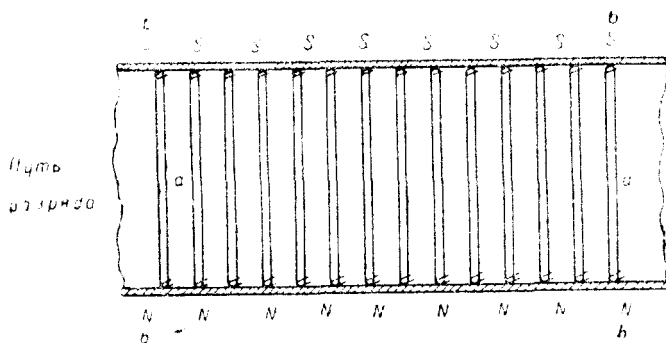


Рис. 7.

вольт. Однако большей частью уже при 300—350 кВ начинался разряд. Для того чтобы избежать разряда в газе, нужно уничтожить ионизацию толчком. Если отклонить все электроны магнитным полем, то ионизация толчком прекратится, но при этом возникает новое затруднение. Отклоненные электроны, оседая на стенках трубки, могут сильно изменить распределение потенциала. Поэтому необходимо не только отклонять в сторону, но и убирать их со стенок трубки. Для этой цели вдоль разрядной трубки Браш и Ланге поместили ряд никелевых пружинящих колец. Стенки трубки были сделаны не из стекла, а из толстого фарфора. Внутренний диаметр трубки был 8 см, а внешний 13. Длина трубки была так рассчитана, чтобы между соседними кольцами разность потенциалов не превышала 3000 В и чтобы разряд не мог произойти между

наружными концами трубки. Поэтому, например, трубку для $1 \cdot 10^6$ V пришлось сделать длиною в 3 м и внутри ее поместить около 300 колец так, что расстояние между двумя соседними кольцами оказалось равным приблизительно 1 см. Отрезок этой трубки изображен на схематическом рис. 7. На этом рисунке буквами *a* обозначены никелевые кольца, а буквами *b* полюса магнитов, служивших для отклонения электронов. Когда такая трубка была испытана на напряжение в 950 kV, то оказалось, что в ней при этом напряжении действительно не происходит ионизации толчком. Но самым поразительным явилось то обстоятельство, что трубка одинаково хорошо работала как с магнитным полем, так и без него. Браш и Ланге вывели из этого заключение, что правильной работе трубки при высоком напряжении мешают не разряды в газе, а разряды вдоль стенок. Исходя из этого, они построили своеобразную разрядную трубку из пластин для напряжения в 2,4 млн. вольт. Трубка эта схематически изображена на рис. 8. Чтобы сделать путь скользящих разрядов от одного металлического кольца до другого возможно более длинным, не увеличивая, а наоборот, уменьшая при этом длину трубки, Браш и Ланге попытались всю трубку сложить из нескольких шайб. На рис. 8 буквой *a* обозначена шайба из алюминия, буквой *b* шайба из пресс-шпана и буквой *c* резиновое кольцо. Последовательность, в какой складыва-

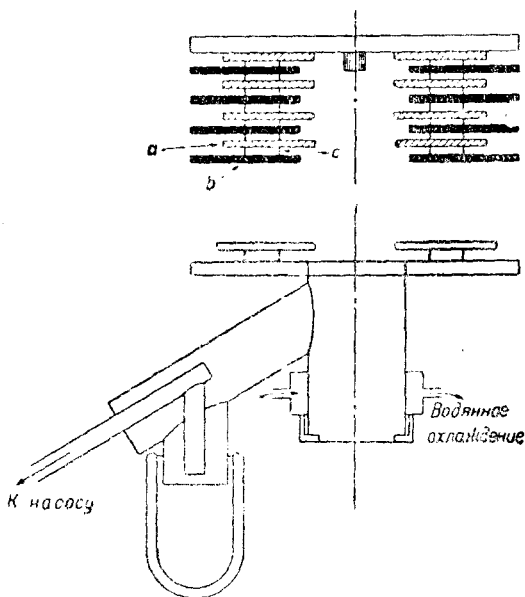


Рис. 8.

при высоком напряжении мешают не разряды в газе, а разряды вдоль стенок. Исходя из этого, они построили своеобразную разрядную трубку из пластин для напряжения в 2,4 млн. вольт. Трубка эта схематически изображена на рис. 8. Чтобы сделать путь скользящих разрядов от одного металлического кольца до другого возможно более длинным, не увеличивая, а наоборот, уменьшая при этом длину трубки, Браш и Ланге попытались всю трубку сложить из нескольких шайб. На рис. 8 буквой *a* обозначена шайба из алюминия, буквой *b* шайба из пресс-шпана и буквой *c* резиновое кольцо. Последовательность, в какой складыва-

лись шайбы, видна из рис. 9. С обеих сторон колонки шайб были помещены толстые медные пластины. В нижней пластине, присоединенной к земле, было проделано отверстие, на которое насаживалась трубка с антикатодом, ответвлением для откачки и сосудом для замора-

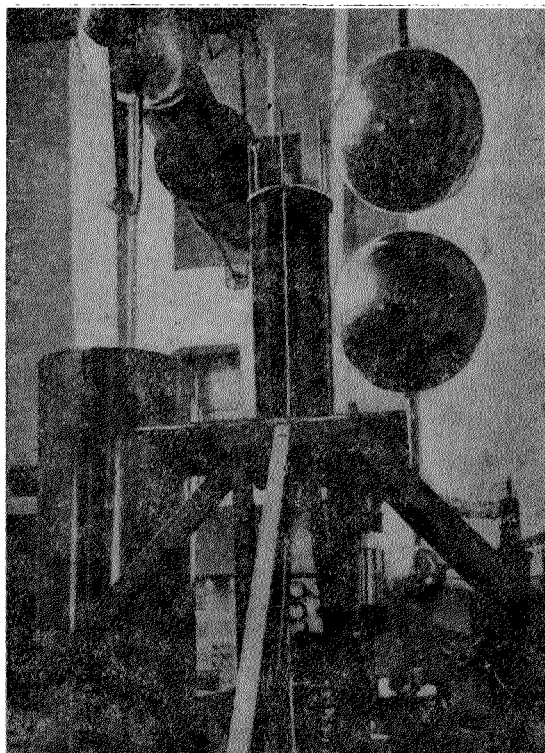


Рис. 9.

живания паров. Резиновые кольца были взяты для того, чтобы сделать соприкосновение между отдельными шайбами непроницаемым для воздуха. Металлические шайбы имели меньший диаметр внутреннего отверстия, и таким образом при разряде в трубке защищали изоляторы от ударов ионов. В последней модели такой трубки, рассчитанной на 2,4 млн. вольт, пресс-шпан был заменен цел-

лоном *. Перед тем как эвакуировать трубку, шайбы прижимались друг к другу специальным приспособлением, которое после откачки убиралось, так как тогда шайбы с достаточной прочностью держались атмосферным давлением. Как это ни странно на первый взгляд, но эвакуирование такой трубки не представило особых затруднений. Подбором определенных сортов резины, заменой прессшпана целлоном и интенсивной конденсацией паров при помощи жидкого воздуха удалось избежать самопроизвольной ионизации остатков газа даже при разности потенциалов в 2,4 млн. вольт. На рис. 9, в центре изображена окончательная модель пластинчатой трубки с приспособлениями для откачки и сдавливания шайб. Трубка присоединена к ударному генератору AEG на $2,4 \cdot 10^6$ V. Справа видны шары искрового промежутка, служившего для промера напряжения. Слева стоит полный цилиндр из прессшпана, в котором помещалась трубка во время работы. Пространство между внешней поверхностью трубки и стенками цилиндра заполнялось трансформаторным маслом. Делалось это для того, чтобы устранить возможность внешних разрядов.

РАБОТА ПЛАСТИНЧАТОЙ ТРУБКИ

Пластинчатая трубка получала от генератора около двух ударов в секунду. Появлявшиеся при этом катодные лучи попадали на антикатод и вызывали жесткие рентгеновые лучи. Для промера их жесткости Браш и Ланге воспользовались тарелками из свинца, положенными одна на другую в количестве 22 штук. Толщина каждой такой тарелки была 5 мм, так что в сумме они составили поглощающий слой в 11 см. Между тарелками были проложены рентгеновские пленки так, как это показано на рис. 10. Путем фотометрирования полученных негативов нетрудно было установить, что полупоглощающий слой для рентгеновых лучей был равен 0,8 см, иначе говоря, жесткость их была

* Прозрачная пленка, по внешнему виду напоминающая целлулоид, но не огнеопасна. В последнее время изготавливается и у нас в СССР.

уже порядка γ -лучей радиоактивных элементов. О мощности этих лучей можно судить по времени экспозиции. Для почернения фильмы, находившейся за 10 см свинца, потребовалось лишь 100 разрядов генератора. Если считать, что каждый разряд продолжается 10^{-4} сек., то истинное время экспозиции оказывается равным всего 0,01 сек. О мощности катодного пучка можно заключить по тем разрушениям, которые были замечены на антикатоде. Быстрые электроны, проникая в антикатод,

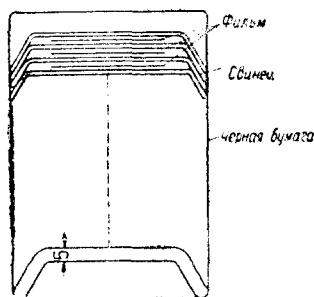


Рис. 10.

в конце своего пути вызывали внезапное и сильное нагревание внутренних частей его. Благодаря этому внутри антикатада образовались пары металла, заставлявшие вздвигаться пузыри на его поверхности. Часто эти пузыри разрывались и распылялись.

Кроме катодных лучей Браш и Ланге получали со своей трубки и каналовые лучи. Для получения их они вводили через стеатитовые капилляры, вставленные в медную пластинку со стороны высокого потенциала, водяной пар при давлении в 0,01 мм. Водяной пар был взят из тех соображений, что излишек его легко вымораживался и, следовательно, не портил вакуума. Опыты с каналовыми лучами производились только при напряжении в 900 кВ. Пробег каналовых лучей в алюминии был измерен и оказался равным 8 р. Опыты с положительными лучами в трубке с $2,4 \cdot 10^6$ В и точный промер пробега таких лучей Браш и Ланге предполагают произвести в ближайшем будущем.

ПОЛУЧЕНИЕ БЫСТРЫХ ИОНОВ БЕЗ ПОМОЩИ ВЫСОКОГО ПОТЕНЦИАЛА

Успехи в получении высоких потенциалов, достигнутые посредством трансформатора Тесла и ударного генератора, настолько заинтересовали экспериментаторов, что начали появляться предложения и даже экспериментальные работы,

в основу которых легли совершенно иные принципы. Весьма интересной в этом отношении является работа Слоана и Лауренса⁴, в которой были получены быстрые положительные ионы с энергией в 1 260 000 при помощи потенциала в 42 000 V. Сущность предложенного вышеупомянутыми экспериментаторами метода заключается в том, что один и тот же ион проходит последовательно несколько электрических полей с одной и той же разностью потенциалов. Предположим, что, пройдя первое поле, ион получил энергию

$\frac{m}{2} v_1^2$. Пройдя второе поле, ион будет обладать энергией

$\frac{m}{2} \cdot 2 v_1^2$, третье $\frac{m}{2} \cdot 3 v_1^2$ и т. д. После прохождения n

полей его энергия будет равняться $\frac{m}{2} n v_1^2$. Обозначим окончательную скорость иона через v_f , тогда из равенства

$\frac{m}{2} v_f^2 = \frac{m}{2} n v_1^2$ получим $v_f = \sqrt{n} v_1$. Таким образом скорость

иона будет расти пропорционально квадратному корню из целых чисел. Исходя из этого соотношения, Слоан и Лауренс построили установку, схематически изображенную на рис. 11. Источником ионов служила ртутная дуга (шарообразная трубка в нижней левой части рисунка). Электрод А, представлявший собой полую трубку длиной около 8 см, заряженную до отрицательного потенциала в 10 000 V, вытягивал в себя положительно заряженные ионы ртути и направлял их вдоль оси прибора. Чтобы уменьшить расхождение пучка, по соседству с А находилась другая трубка (фокусирующий электрод) такой же длины, но заряженная до более низкого потенциала от 15 000 до 20 000 V. Край этой трубки, обращенный к А, был заострен, чтобы создать неравномерное поле, симметричное оси трубок. Проходя это поле, пучок выравнивался и достигал ускоряющих электродов уже приблизительно параллельным. Система ускоряющих электродов состояла из ряда трубок, длина которых возрастала пропорционально корню из целых чисел*. Каж-

* Строго говоря, под длиной трубки надо понимать трубку и соседний с ней промежуток.

дая пара этих трубок была соединена с противоположными зажимами лампового генератора мощностью в 20 kW. Промежуток времени, который необходим был иону, чтобы пройти какую-либо трубку, был равен полупериоду колебаний генератора. Таким образом ион всегда входил в трубку с отрицательным потенциалом, но выходил из нее уже тогда, когда эта трубка становилась положительной. После

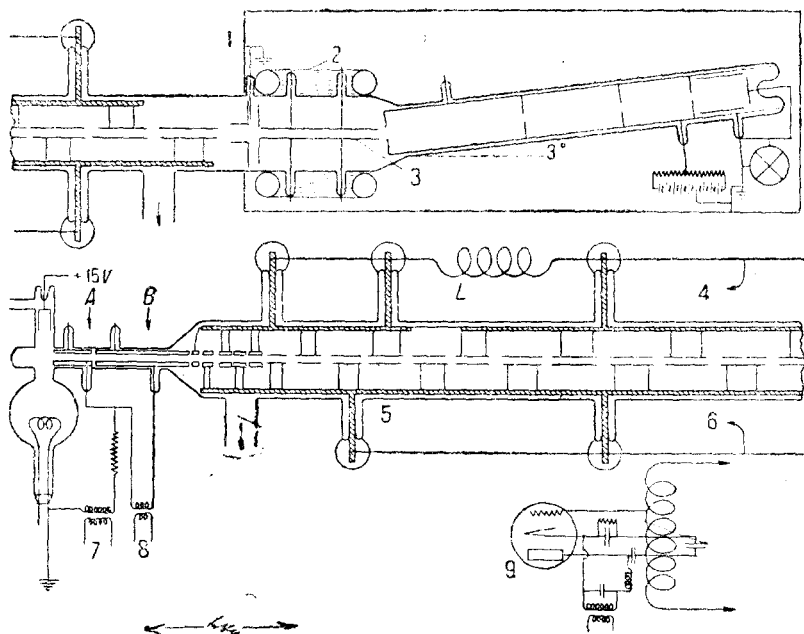


Рис. 11.

прохождения тридцати таких трубок энергия иона возрастала с 42 000 V (максимальный вольтаж генератора)* до $12 \times 30 = 1\,260\,000$ V.

Несомненно, что наибольшая экспериментальная трудность, которую пришлось преодолеть Слоану и Лауренсу при сборе установки, состояла в синхронизации всей си-

* Как видно из рис. 11 вольтаж в 42 000 V получился при помощи трансформатора Тесла, работавшего с гальванической связью на незатухающих колебаниях.

стемы. После того как по расчету были построены ускорители, можно было бы, меняя расстояние между ними, добиться максимального ускорения ионов. Максимум тока служил бы тогда указанием на то, что синхронизм достигнут. Однако передвигать ускорители в столь сложной установке представляло собой настолько трудную задачу, что от нее пришлось отказаться. Вместо этого для изменения фазы вводились добавочные катушки самоиндукции, а влияние их на пучок ионов изучалось при помощи отклоняющего электрического поля, помещенного за последним ускорителем (см. рис. 11, наверху справа). Поле это создавалось между двумя

пластинками, расположенными на расстоянии 1 см друг от друга. Длина пластинок равнялась 20 см. К этим пластинкам прилагалась разность потенциалов достаточная для того, чтобы отклонить пучок ионов на 30° и направить его, таким образом, в фарадеев цилиндр, находившийся в конце трубки. Измеряя накопление заряда на фарадеевом цилиндре, можно было вычислить силу тока, а зная разность потенциалов, можно было определить и скорость ионов ртути. Для того чтобы отрицательные электроны не могли попадать в цилиндр и влиять на измерение, они отклонялись магнитным полем двух катушек, помещенных снаружи трубки (рис. 11). Результат одного из таких измерений дан на рис. 12, который показывает, как

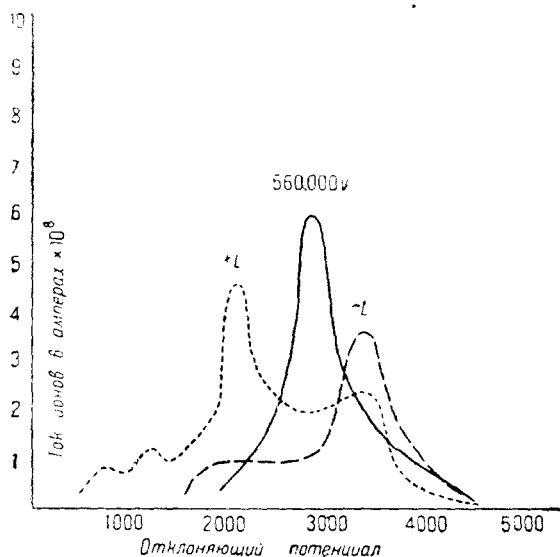


Рис. 12.

влияло изменение самоиндукции на силу тока. На оси ординат отложена сила тока в пучке в амперах, умноженная на 10^8 . По оси абсцисс нанесены разности потенциалов на конденсаторе, служившем для отклонения пучка. Центральная кривая соответствует наиболее подходящему значению самоиндукции. При увеличении самоиндукции ($+L$), а также при уменьшении ее ($-L$) кривые имеют меньшие максимумы. Зависимость энергии ионов от частоты генератора в окончательной установке показана на рис. 13. Из

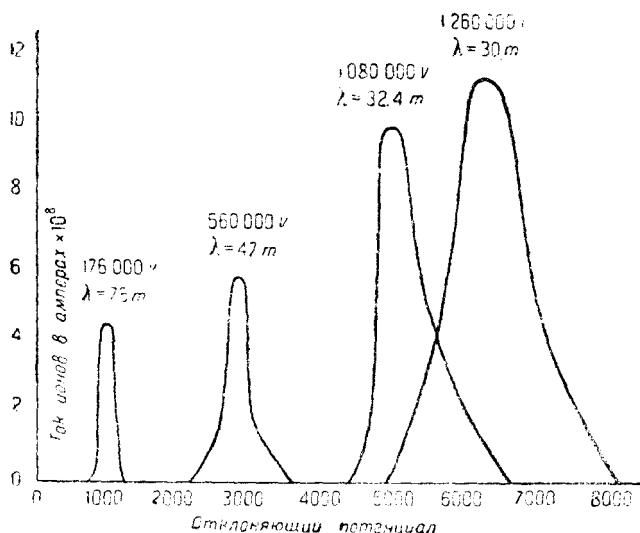


Рис. 13.

этого рисунка видно, что потенциал в 1 260 000 V мог быть получен лишь при длине волны в 30 м. Заметим еще, что на практике оказалось излишним подбирать самоиндукцию для каждого ускорителя в отдельности. На рис. 10 мы видим, что для первых десяти ускорителей введена только одна самоиндукция (буква L на рис. 10). Других особых затруднений при выполнении этой установки не встречалось. Фокусирование пучка вблизи ртутной дуги мы уже описали. На дальнейшем своем пути пучок, проходя неоднородные поля между ускорителями, становился все более и более параллельным. Так как потенциал в трубке нигде

не превышал значения 42 000 V, то получение достаточного вакуума также не представляло никаких затруднений. При помощи двух конденсационных насосов в трубке с ускорителями поддерживалось давление в 10^{-5} мм ртутного столба. Давление ртутных паров около дуги было равно 10^{-8} мм.

Так как все описанные опыты по ускорению производились с ионами ртути, то общая длина трубки была невелика, всего около 114 см. Совсем иные размеры мы получили бы, если бы попытались построить такого же типа установку для получения протонов с той же энергией в 1 260 000 V. В этом случае скорость ионов была бы почти в 15 раз больше, следовательно, и ускорители должны быть во столько же раз длиннее. Таким образом для получения протонов с энергией в 1 260 000 V понадобилась бы трубка приблизительно в 20 м. Соответственное удлинение ускорительной системы получим также, если будем переходить к более быстрым ионам ртути. Слоан и Лауренс подсчитывают, что для получения ртутного пучка с энергией в 10 млн. вольт длина трубки будет 8 м. Эта длина сократится только в том случае, если ускорять ионы не с одним зарядом, а с двумя или с тремя. Возможно, что такого типа установку гораздо легче было бы использовать для ускорения α -частиц от радиоактивных элементов. Так как масса их в 4 раза больше, чем масса протонов, и они уже обладают энергией в несколько миллионов вольт, то все это вместе взятое значительно укоротило бы систему ускорителей, а между тем мы получили бы лучи, с помощью которых можно бы с большей силой воздействовать на ядро атомов.

Синхронный ускоритель с магнитным полем

Для того чтобы устранить главное затруднение, появляющееся при синхронном ускорении легких ионов, а именно чрезвычайно большую длину ускоряющей системы, Лауренс и Ливингстон поместили ускоритель в сильном магнитном поле *. Рис. 14 дает полное представление об основной идее этого опыта. Ускоритель АВ представляет

собой полый металлический цилиндр, разрезанный по диаметру abc . Половины цилиндра присоединяются к клеммам лампового генератора и, таким образом, по линии разреза получается переменная разность потенциалов. Магнитное поле направлено перпендикулярно к основаниям цилиндра (см. H в верхней части рисунка). Если ион в некоторый

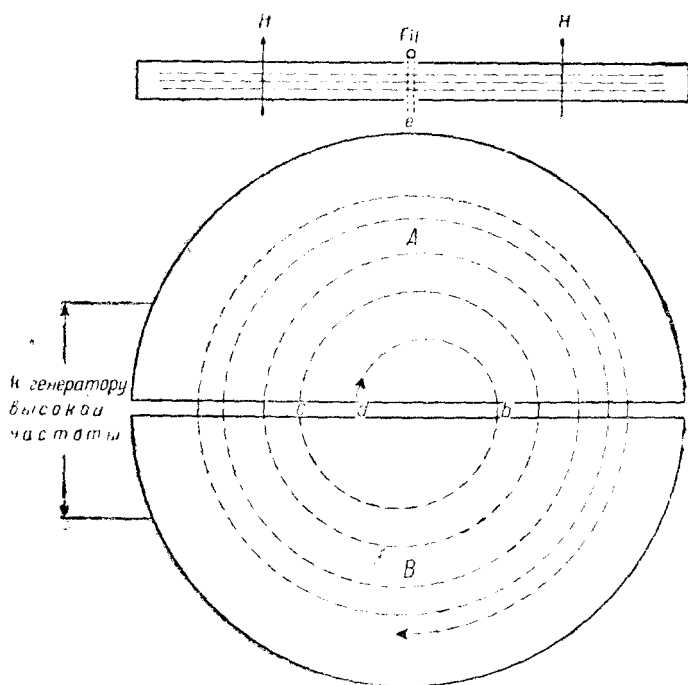


Рис. 14.

момент времени получит ускорение от электрического поля около a в направлении, указанном на рисунке стрелкой, то дальнейший путь его в половине диска A будет представлять собой полуокружность ab . Если время, которое понадобится ему на прохождение полуокружности, равно полупериоду генератора, то около b ион вновь получит ускорение и в части B опишет полуокружность большего радиуса bc и т. д. Чтобы получить более точное представ-

ление о пути иона, напишем уравнение его движения в магнитном поле:

$$\frac{mc^2}{r} = \frac{Hev}{c}.$$

При помощи этой формулы мы можем найти время t , необходимое для прохождения полуокружности:

$$t = \frac{\pi r}{v} = \frac{\pi mc}{He}.$$

Как мы видим, время t определяется только массой иона m , его зарядом e и приложенным магнитным полем H . От радиуса r и скорости v это время не зависит. Так как t есть полупериод колебаний генератора, то при данном H мы можем вычислить длину волны, необходимую для синхронизма. Эта длина будет:

$$\lambda = 2t \cdot c = \frac{2 \cdot \pi mc^2}{He}.$$

Из этой формулы мы получаем, например, что для протона при магнитном поле в 10 000 гаусс длина волны генератора должна быть 19,4 м. Вычислим теперь энергию, которую получит ион при прохождении окружности радиуса r . Если обозначить через V_0 максимальное значение потенциала генератора, то эта энергия будет равна:

$$e \cdot \frac{V_0}{300} = \frac{mv^2}{2} = m \cdot \frac{H^2 r^2}{c^2} \cdot e^2.$$

Или выражая эту энергию в вольтах на электрон:

$$V_0 = 150 \cdot \frac{H^2 r^2}{c^2} \cdot \frac{e}{m}.$$

Таким образом энергия будет пропорциональна квадрату магнитного поля и квадрату радиуса.

На практике оказалось наиболее целесообразным взять вместо двух описанных выше электродов только один A (рис. 15). Этот электрод представлял собой полный полуцилиндр с диаметром в 24 см и высотой в 1 см. Стенки его были сделаны из очень тонкой латуни. Электрод A поме-

щелся в коробке из красной меди, но был от нее достаточно хорошо изолирован. Внутренние размеры коробки были $2,6 \times 28,6 \times 28,6$ см³. Вторым электродом служила пластинка со щелью s , металлически соединенная с коробкой. Ширина щели была 1 см. Электрод A и вся коробка при-

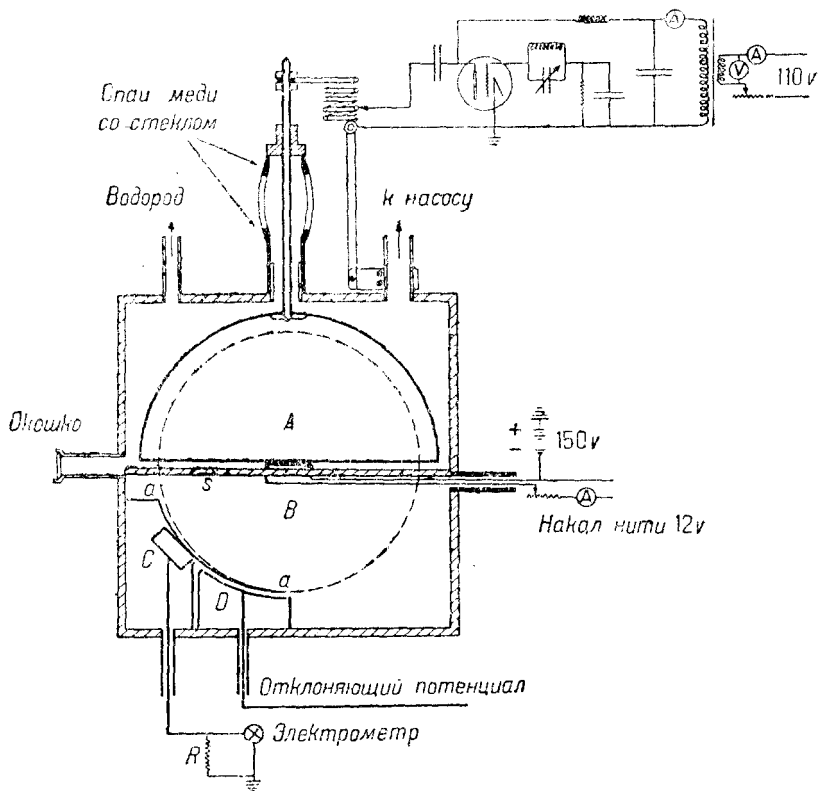


Рис. 15.

соединялись к противоположным клеммам генератора. В результате между щелью s и краями полуцилиндра получалось такое же ускоряющее поле, какое должно было бы получиться между двумя полуцилиндрами. Для получения водородных ионов газ, находившийся в центре прибора, ионизировался электронами, выходящими из накаливаемой нити. Расположение нити по отношению к электроду A

схематически представлено в верхней части рис. 14. Проходя последнюю окружность, ионы должны были пройти ряд щелей *aa*, расположенных в нижней части прибора (рис. 15). Щели служили для того, чтобы отфильтровать ионы, скорость которых по величине или по направлению могла изменяться благодаря столкновению или отражению. Между двумя щелями помещалось отклоняющее электрическое поле, создаваемое пластинками *D*. После отклонения пучок ионов попадал в фарадеев сосуд *C*. Заряд этого сосуда измерялся при помощи электрометра. Фотография внутренних частей коробки дана на рис. 16. Одной из наиболее трудных задач в установке Лауренса и Ливингстона было создание обширного, достаточно сильного и однородного магнитного поля. Полюса электромагнита, который был изготовлен для этой

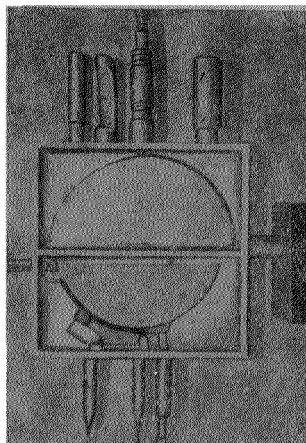


Рис. 16.

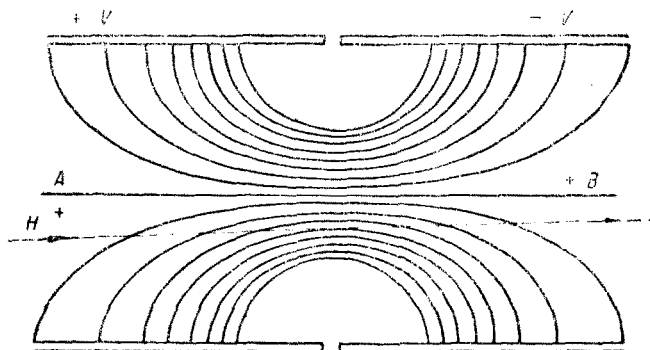


Рис. 17.

установки, имели 27,5 см в диаметре, а расстояние между ними было 3,75 см. Магнитодвижущая сила создавалась двумя катушками, каждая из которых имела по 2000 витков. При помощи этого электромагнита можно было полу-

чить поле напряжением в 14 000 гаусс. Поверхности полюсов были сделаны параллельными друг к другу с точностью до 0,2%. Исследование различных частей поля при помощи висмутовой спирали показало, что поле действительно совершенно однородно и равномерно за исключением области, отстоящей от периферии на расстоянии меньшем, чем 2,5 см.

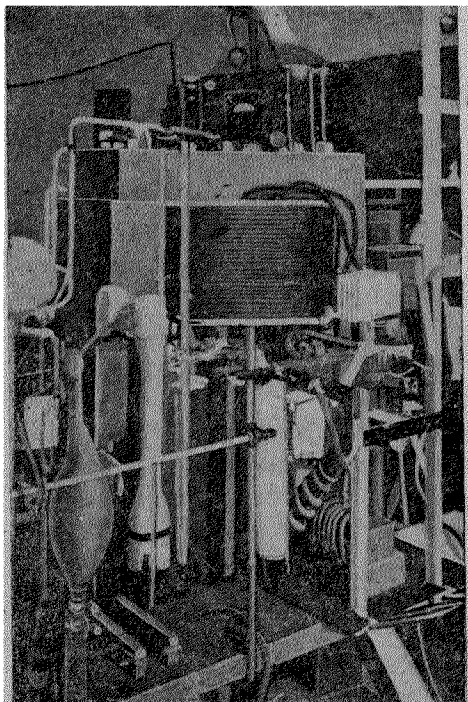


Рис. 18.

Последовательное прохождение пучком протонов поля между электродами в установке с магнитным полем вызывало то же фокусирующее действие, как и прохождение полей ионами ртути между отдельными ускорителями в установке, описанной нами раньше. Для большей наглядности Лауренс и Ливингстон приводят диаграмму движения положительного иона в поле между электродами. Скорость движения иона в области *A* (до ускорения)

(рис. 17) меньше, чем в области *B* (после ускорения), и потому его отклонение к линии *AB* в первой половине сильнее, чем отклонение от *AB* во второй. Специальными опытами было установлено, что фокусирование сводит все быстрые протоны в пучок, имеющий ширину всего в 1 мм.

О точности работы установки Лауренса и Ливингстона (общий вид ее представлен на рис. 18) можно заключить из приведенных ими кривых. Эти кривые изображены на

рис. 19. Верхняя кривая вычислена на основании формулы:

$$\lambda = \frac{2 \pi m c^2}{H e}$$

для H_2^+ , нижняя для H^+ . По оси ординат отложены длины волн в метрах, по оси абсцисс магнитные поля в гауссах, дававшие максимальные значения тока (по измерениям заряда на фарадеевом цилиндре). Кружками отмечены значения, наблюдаемые экспериментально. Как видно из рисунка, все экспериментальные точки лежат на теоретических

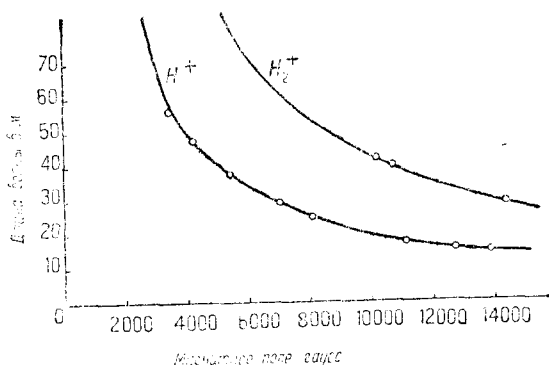


Рис. 19.

кривых. О работе установки в различных условиях дает представление другой рис. 20 (аналогичный чертежу в установке с ускорителями). Абсциссы рис. 19 представляют собой отклоняющие потенциалы в вольтах, ординаты—силу

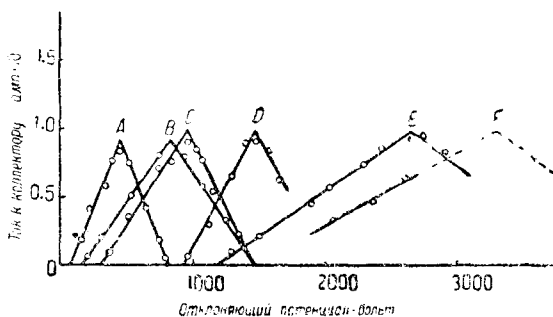


Рис. 20.

протонного тока в амперах, умноженных на 10^9 . Из кривых этого рисунка мы видим, что наилучший результат, именно пучок протонов с энергией в 1220 000 V получается при $\lambda = 14,1$ м.

В ближайшем будущем Лауренс и Ливингстон рассчитывают при помощи магнита с полюсами диаметром в 114 см и с тем же напряжением поля в 14 000 гаусс получить поток протонов с энергией в 25 млн. вольт.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОГО ПОТЕНЦИАЛА

К сожалению, об электростатическом генераторе имеются в литературе настолько скудные сведения⁶ (краткие резюме в протоколах Американского физического общества), что о нем можно сказать всего несколько слов. Ван-де-Грааф, предложивший этот генератор, воспользовался основным фактом электростатики о распределении заряда на поверхности проводника. Этим обстоятельством, как известно, можно воспользоваться, чтобы передать весь заряд небольшого проводника другому проводнику, большему по размерам и полному внутри. Для полной передачи достаточно прикоснуться заряженным телом ко внутренней поверхности полого проводника, причем совершенно безразлично, до какого потенциала заряжен такой полый проводник. Ван-де-Грааф усовершенствовал этот элементарный опыт следующим образом. Он укрепил два медных полых шара диаметром в 60 см на стержнях из пирекса. Внутри каждого шара помещался шкив. У нижнего конца пирексовых стержней находилось также по шкиву. Наружные шкивы приводились мотором в быстрое вращение. Через шкив, находившийся внутри и снаружи шара, и через сделанное в нем отверстие перекидывалась шелковая лента. Подымающаяся вверх поверхность ленты при помощи щетки, соединенной через кенотрон с трансформатором, заряжалась до потенциала в 10 000 V. У верхнего шкива этот заряд посредством острий стекал на внутреннюю поверхность шара. Заряжая таким способом оба шара противоположным электричеством, Ван-де-Граафу удалось получить разность потенциалов в 1 500 000 V. Преимуществом этой установки является постоянство потенциала. При помощи такого потенциала можно получить пучок протонов, движущихся с совершенно одинаковыми и постоянными скоростями. Вот почему Тюве, Хевстед и Даль считают электростатический генератор наиболее пригодным источником высокого вольтажа в работах, имеющих целью дать точные численные значения величин, относящихся к протонам. Заметим,

что Ван-де-Грааф, получив на своей первой установке только 1 500 000 V, намерен идти дальше по пути увеличения потенциала. Для этой цели ему понадобится только приготовить шары большего диаметра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем обзоре нами были упомянуты и более или менее подробно разобраны четыре различных установки. Все они были предназначены для получения быстрых ионов, главным образом, быстрых протонов. Каждая из этих установок имеет и свои преимущества и свои недостатки. Трансформатор Тесла отличается простотой своей конструкции и возможностью легко разрешить вопрос о вводе высокого потенциала путем помещения вторичной спирали непосредственно в разрядную трубку. Недостатки трансформатора Тесла, — и притом очень существенные, это — переменное напряжение и явления, связанные с токами высокой частоты (например, истечения из всех находящихся вблизи металлических предметов).

Ударный генератор по конструкции еще проще, так как он, если можно так выразиться, представляет собой только первичный контур трансформатора Тесла (точнее, емкость первичного контура). Однако ударный генератор, хотя и дает при периодическом разряде потенциал одного знака, но все же этот потенциал не постоянен. Кроме того, для ускорения протонов он требует постройки специальной разрядной трубки, в которой должны быть уничтожены скользящие разряды. Синхронный ускоритель ионов выгодно отличается от других установок тем, что он не требует специальной разрядной трубки и особенно высокого вакуума, так как вся работа его протекает при потенциалах всего в несколько тысяч вольт. Другое весьма важное преимущество синхронного ускорителя, это — почти идеальная фокусировка ионного пучка. Недостатками синхронного ускорителя являются его сложность и размеры магнитного поля (или системы ускорителей в установке без магнита). Электростатический генератор прост, дает постоянный по-

тенциал, но неудобен в лабораторной обстановке благодаря размерам своих шаров-электродов. Едва ли можно сомневаться, что каждая из этих установок вполне пригодна для создания пучка протонов, при помощи которого можно было бы воздействовать на ядра атомов. Однако не случайным является тот факт, что впервые расщепление атомов искусственным пучком протонов удалось произвести Кокрофту и Уолтону ^{7, 8, 9} посредством простого высоковольтного трансформатора, ток которого был выпрямлен, а колебания потенциала сглажены, посредством включения емкостей.

В заключение отметим, что хотя замечательная и наиболее удачная работа по расщеплению атома и была сделана при помощи простого высоковольтного трансформатора, дальнейшие работы по расщеплению более тяжелых элементов, несомненно, потребуют применения протонов с большей энергией. Поэтому нужно ожидать, что в ближайшем будущем установки, предназначенные для получения быстрых протонов, будут разрабатываться физиками с еще большей интенсивностью и тщательностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. В. Мысовский, Лабораторные методы получения высоких потенциалов, Усп. Физ. Наук, 1930 г. X, вып. 4, стр. 545.
2. M. A. Tuve, L. R. Hafstad, O. Dahl, Phys. Rev. 39, 384, 1932.
3. A. Brasch u. J. Lange, Zeitschr. f. Phys. 72, 10, 1931.
4. D. H. Sloan, and E. A. Lawrence, Phys. Rev. 38, 201, 1931.
5. E. O. Lawrence, and Livingston, Phys. Rev. 40, 19, 1932.
6. R. S. van de Graaf, Schenectady Meeting Am. Phys. Soc., 1931.
7. Cockroft J. J. a. E. T. S. Walton, Proc Royal Soc., A, 129 477, 1930.
8. Cockroft J. J. a. E. T. S. Walton, Nature 1932, February, 13, p. 242.
9. Cockroft J. J. a. E. T. S. Walton, Nature 1932, May, 7, p. 446.