

962

13
3-14



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Б.А. Загер, Г. Индреаш, В.Г. Тишин, И.А. Шелаев

P-962

ЭЛЕКТРОННАЯ ЗАГРУЗКА
РЕЗОНАТОРА ЦИКЛОТРОНА
ЖТЭ, 1963, №2, с 20-24.

Б.А. Загер, Г. Индреаш, В.Г. Тишин, И.А. Шелаев

P-962

ЭЛЕКТРОННАЯ ЗАГРУЗКА
РЕЗОНАТОРА ЦИКЛОТРОНА

Направлено в ПТЭ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Дубна 1962 год

В 1/9541

А н н о т а ц и я

Наблюдавшаяся на циклотронах У-300 и У-150 электронная загрузка резонатора объясняется возникновением лавины электронов, осциллирующих между кромками дуантов. Описывается механизм этого явления и предлагается ряд мер для уменьшения загрузки резонатора и сокращения времени тренировки ускорителей.

Abstract

An electron loading of the resonator observed in the Y - 300 and Y - 150 cyclotrons is accounted for the appearance of the avalanche of electrons oscillating between the dee edses.

A mechanism of this phenomenon is described and some measures are suggested for decreasing the resonator loading and for reducing the duration of accelerator training.

Известно, что величина ускоряющего напряжения в циклических ускорителях определяется добротностью резонатора и вводимой в него колебательной мощностью. Однако наличие высокочастотного электрического поля в эвакуированной полости резонатора неизбежно приведет к возникновению нежелательных процессов, связанных с прохождением электрического тока в вакууме, а, следовательно, и к некоторым потерям мощности возбуждающей резонатор.

Наблюдалось^{/1/}, что при работе линейных ускорителей происходит "тренировка" поверхности резонаторов, в результате чего интенсивность разрядных процессов уменьшается и, как следствие этого, увеличивается ускоряющее напряжение. Аналогичные явления происходят и в циклических ускорителях. Во время наладки и эксплуатации циклотронов ОИЯИ /3-х метровый циклотрон многозарядных ионов У-300 и 150-сантиметровый циклотрон У-150/ авторами было обнаружено, что в случае, когда высокочастотная мощность подается в "нетренированную" систему, амплитуда ускоряющего напряжения зависит от наличия магнитного поля. /Здесь и дальше имеется в виду магнитное поле большой напряженности: $H > 10 \text{ Кэ} /$.

Обычно в нашем случае при выключенном магнитном поле напряжение на дуантах "нетренированного" ускорителя/ на 25-30% больше, чем при включенном при одном и том же значении мощности, вводимой в резонатор.

После 20-30 часов тренировки, сводящейся к поддержанию на дуантах максимально возможного напряжения, магнитное поле перестает влиять на величину напряжения, и ускоритель может работать при достаточно высоких ускоряющих потенциалах.

На рис. 1 и 2 представлены зависимости дуантного напряжения циклотронов У-300 и У-150 от анодного напряжения генераторов, снятые в процессе тренировки. Нетрудно видеть, что с увеличением времени тренировки прямые приближаются к зависимости, снятой в отсутствие магнитного поля. Параметром, характеризующим степень тренировки, может служить относительная величина высокочастотной мощности, потребляемой процессами, возникающими при наличии магнитного поля.

Действительно, напряжение на дуантах определяется хорошо известной зависимостью:

$$U_g = \sqrt{P Q \rho}, \quad /1/$$

где U_g - амплитуда напряжения между дуантом и нулевым электродом /камерой/;
 Q - добротность резонансной системы;
 ρ - характеристическое сопротивление контура;
 P - колебательная мощность, затрачиваемая на возбуждение резонатора.

В этом случае доля мощности, потребляемая процессами, существующими при включенном магнитном поле, определится как

$$\eta = \frac{P_n}{P_0} = 1 - \left(\frac{U_{d1}}{U_{d2}} \right)^2; \quad /2/$$

где P_0 - полная колебательная мощность, вводимая в резонатор, P_n - мощность потерь, U_{d1}, U_{d2} - напряжение на дуантах при включенном магнитном поле и без магнитного поля, соответственно. Отдельными графиками на рис. 1 и 2 представлены зависимости изменения η во времени в процессе тренировки. В начале тренировки η достигает 50%. Тренировка в нашем случае обычно заканчивалась при $\eta \approx 10\%$.

Помимо увеличения ускоряющего напряжения, тренировка улучшает электрическую прочность промежутка дуант-камера. В "тренированной" системе дуговые пробои этого промежутка происходят при более высоких напряжениях, чем в "нетренированной".

В результате неоднократных наблюдений было обнаружено, что при "тренировке" ускорителя на кромках и внутренних поверхностях дуантов образуется значительный слой углерода в виде тени противоположного электрода. На рис. 3 приведены характерные случаи образования такого слоя.

Если при разборке и ревизии ускорителя этот слой снимался, то "тренировка" занимала несколько десятков часов. Если слой углерода оставался нетронутым, то "тренировка" длилась несколько десятков минут, причем в этом случае она обычно сводилась к удалению остаточного газа с поверхности резонатора.

Увеличение затухания резонатора циклотрона при включенном магнитном поле / в "нетренированной" системе/ и образование слоя углерода, создающего условия для ликвидации этого дополнительного затухания, достаточно хорошо объясняется существованием электронного облака, осциллирующего между кромками дуантов. Возможность такой осцилляции определяется одновременным наличием магнитного поля, электрического поля, провисающего между кромками, и вторичной эмиссией с поверхности дуанта.

Рассмотрим электрон, находящийся на поверхности кромки. Между кромками дуанта существует провисающее электрическое поле /рис. 4/, причем очевидно, что вертикальная составляющая напряженности поля является потенциальной функцией, симметричной относительно середины расстояния между кромками, т.е.

$$\int_{-z}^{+z} \frac{\partial u}{\partial z} dz = 0. \quad /3/$$

Уравнение движения электрона имеет вид:

$$m \ddot{z} = e E_z = e E_z(z, x) \sin \omega t, \quad /4/$$

где

$$E_z(z, x) = - \frac{\partial U(z, x)}{\partial z} = - U_m \frac{\partial}{\partial z} f(z, x). \quad /5/$$

Разложив функцию $f(z, x)$ в ряд по четным степеням z и пренебрегая степенями выше второй, имеем

$$\ddot{z} = -\frac{e}{m} U_m a_2 \frac{z}{h^2} \sin \omega t ; \quad /6/$$

где a_2 - коэффициент квадратичного члена разложения в ряд,
 h - половина расстояния между кромками.

Рассматривая движение электрона за малый промежуток времени, когда можно считать, что

$$\sin \omega (t + \Delta t) \approx \sin \omega t \approx \text{Const} , \quad /7/$$

получаем частоту вертикальных колебаний электрона

$$\omega_{\ominus} = \sqrt{-\frac{e U_m a_2}{m h^2} \sin \omega t} \quad /8/$$

и

$$\ddot{z} = -\omega_{\ominus}^2 z . \quad /9/$$

Очевидно, что при $\sin \omega t > 0$ движение электрона будет аperiodическим, при $\sin \omega t < 0$ - колебательным.

В нашем случае расчеты дают значение частоты, равное

$$\omega_{\ominus} \approx (1-2) 10^{10} \sqrt{\sin \omega t} ;$$

что в 300-600 раз выше частоты колебаний ускоряющего напряжения циклотрона.

Такое соотношение между частотами вполне оправдывает допущенное приближение /7/.

Наличие в зазоре составляющей электрического поля E_x приведет к тому, что электроны будут перемещаться вдоль кромок. Оценки показывают, что за время, равное половине периода колебаний ускоряющего напряжения 10^{-7} сек/, электроны могут пройти расстояние порядка 3 м. Это означает, что колеблющиеся электроны будут существовать по всей длине щели между кромками дуанта.

Энергия, приобретаемая электроном за время пролета расстояния между кромками, может быть записана как:

$$E_x = e \Delta U , \quad /10/$$

где ΔU - изменение потенциала за время, равное половине периода вертикальных колебаний электрона.

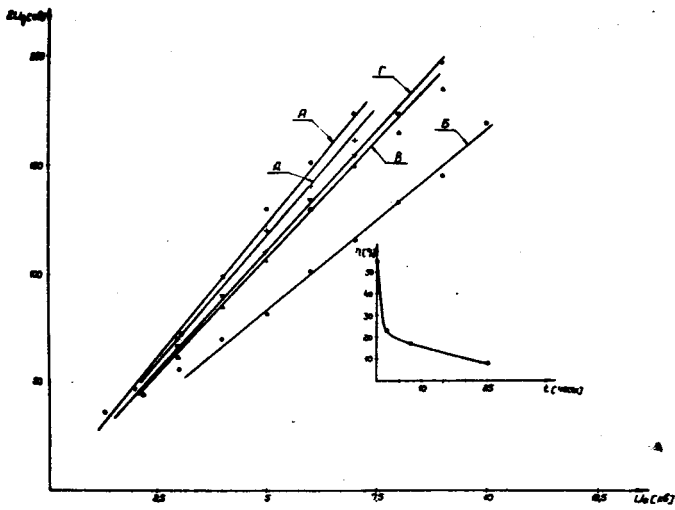


Рис. 1.

Влияние тренировки на электронную загрузку резонатора циклотрона У-300.

- А - $H=0$; $\eta=0$
- Б - $H \neq 0$; $t=0$, $\eta=55\%$;
- В - $H \neq 0$; $t=2$ часа, $\eta=23\%$
- Г - $H \neq 0$; $t=8$ часов $\eta=18,5\%$
- Д - $H \neq 0$; $t=25$ часов $\eta=8\%$.

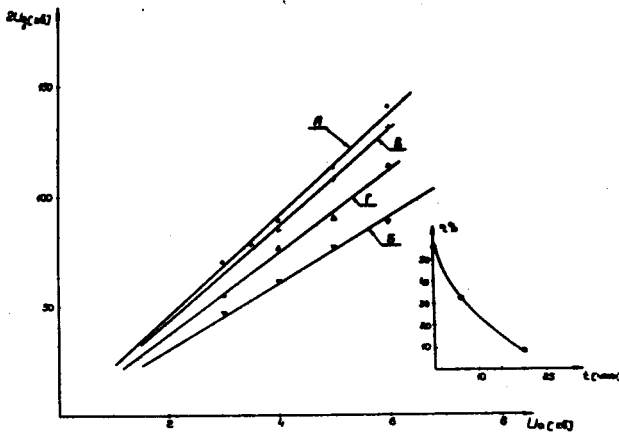


Рис. 2.

Влияние тренировки на электронную загрузку резонатора циклотрона У-150;

- А - $H=0$; $\eta=0$
- Б - $H \neq 0$; $t=0$ $\eta=55,50\%$
- В - $H \neq 0$; $t=8$ часов $\eta=32\%$
- Г - $H \neq 0$; $t=20$ часов $\eta=8\%$.

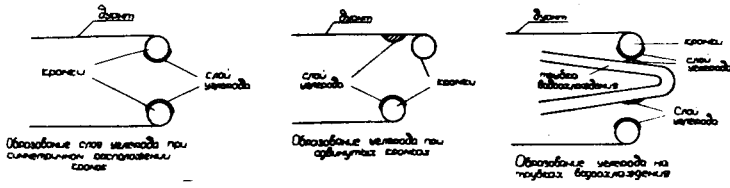


Рис. 3.

Образование углерода на кромках дуантов.

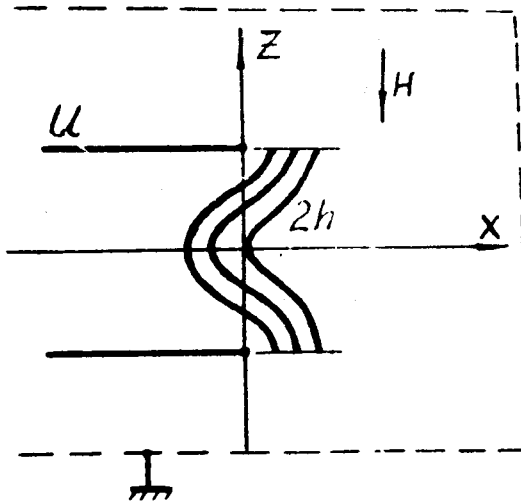


Рис. 4.

Провисание электрического поля между кромками дуантов.

В этом случае имеем:

$$\Delta U = U_m [\sin \omega (t + \tau) - \sin \omega t] \cong \omega U_m \cos \omega t ;$$

/11/

или

$$\Delta U = U_m (1,2 - 2,4) 10^{-3} \frac{\cos \omega t}{\sqrt{\sin \omega t}} .$$

При $U_m \sim 150$ Кв и фазах колебаний ускоряющего напряжения, больших $3/2 \pi$, энергия осциллирующих электронов выше 100 эв, что может привести к вторичной эмиссии с коэффициентом, большим 1.

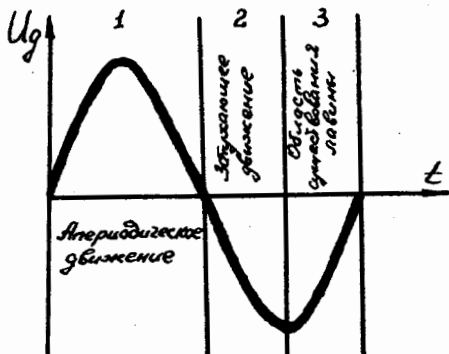


Рис. 5.

Таким образом, мы можем рассматривать три участка периода колебаний ускоряющего напряжения, отличающихся по воздействию на электрон.

1. На дуантах существует напряжение, положительное по отношению к камере. В этом случае сила, действующая на электрон, направлена к кромкам и электроны не будут вытягиваться с поверхности.

Очевидно, что этот промежуток равен $T/2$, где T - период в.ч. напряжения. / рис. 5/.

2. Напряжения на дуанте отрицательно и увеличивается во времени. В этом случае электроны вылетевшие под действием силы E_z будут колебаться с затухающей амплитудой, сосредотачиваясь в центре между кромками дуантов /в точке, где $E_z = 0$ /.

3. Напряжения на дуанте отрицательно и уменьшается во времени. Электроны, вылетевшие под действием силы E_z , будут ускоряться при пролете расстояния h . Торможение электронов при пролете второй половины зазора будет меньше, поскольку за это время поле уменьшится. В силу этого, электроны приобретут энергию E_k и при соударении их со второй кромкой появится некоторое количество вторичных электронов, определяемое энергией E_k и коэффициентом вторичной эмиссии материала кромок.

Аналогичная ситуация повторится и для вторичных электронов. Между кромками, таким образом, будет осциллировать электронная лавина. Естественно, что для поддержания лавины необходима некоторая мощность, отбираемая от электрического поля. В результате напряжение на дуантах будет уменьшаться. Если магнитное поле отсутствует, то электроны будут уходить на стенки камеры и там теряться.

Существование лавины, помимо уменьшения мощности, неизбежно снизит электрическую прочность зазора камера-дуанта, т.к. часть электронов за счет дрейфа будет уходить в этот зазор, способствуя возникновению высоковольтных высокочастотных пробоев по периметру дуанта.

Известно^{/2/}, что под воздействием электронной бомбардировки пленка диффузион-

ного масла подвергается крекингу, образуя слой углерода на поверхности. На кромках дуантов, покрытых масляной пленкой, будет происходить такой же процесс и кромки покроются углеродом. Однако, графитизация кромок должна приводить к ликвидации лавины, поскольку коэффициент вторичной эмиссии пористого слоя углерода значительно меньше $1/3$.

Для проверки предположения о подавлении лавины слоем углерода кромки дуантов циклотрона /У-150/ были искусственно покрыты сажей. Непосредственно после откочки снимались зависимости дуантного напряжения от анодного напряжения мощных каскадов. Результаты измерений при двух различных коэффициентах усиления мощных каскадов генератора приведены на рис. 6.

В обоих случаях коэффициент η близок к нулю, что свидетельствует о достаточном подавлении лавины осциллирующих электронов.

Таким образом, искусственное покрытие кромок дуантов сажей может быть использовано для уменьшения времени тренировки циклотрона.

Обычно конструкция дуантов выполняется в виде двух плакировок, укрепленных на раме, и кромки плакировок образуют щель не только в ускоряющей промежутке, но и по всему периметру дуанта. /Именно такая конструкция осуществлена в ускорителях У-300 и У-150/.

Авторами было предложено закрыть наружные щели медным листом с целью уменьшения поверхности, где возможно возникновение электронной лавины.

На рис. 7 приведены зависимости $U_g = f[U_a]$ для дуантов с открытыми и закрытыми щелями по наружному периметру. Как видно из рисунка, потери на электронную загрузку при закрытых щелях уменьшились до 7%. Кроме того, после ликвидации щелей возросла электрическая прочность зазора дуант-камера по наружному периметру дуанта.

Таким образом, существование электронной лавины, обусловленной наличием магнитного поля и провисанием электрического поля в щель между кромками дуантов, вполне удовлетворительно объясняет и появление дополнительного затухания в нетренированной вакуумной системе и сам процесс тренировки, приводящий к образованию слоя углерода на внутренних кромках дуанта.

В заключение можно отметить, что наблюдавшееся в ¹⁴/ увеличение гамма-излучения циклотрона при включении магнитного поля вполне может быть объяснено возникновением описанной выше электронной лавины и дрейфом части осциллирующих электронов в высоковольтный промежуток дуант-камера.

Электронная загрузка осциллирующими электронами обязательно должна учитываться при конструировании дуантов. Конструкция должна содержать минимальное количество щелей, допускающих существование такого процесса, обеспечивая при этом необходимую скорость откочки полости дуантов.

ного масла подвергается крекингу, образуя слой углерода на поверхности. На кромках дуантов, покрытых масляной пленкой, будет происходить такой же процесс и кромки покроются углеродом. Однако, графитизация кромок должна приводить к ликвидации лавины, поскольку коэффициент вторичной эмиссии пористого слоя углерода значительно меньше $1^{/3/}$.

Для проверки предположения о подавлении лавины слоем углерода кромки дуантов циклотрона /У-150/ были искусственно покрыты сажей. Непосредственно после откачки снимались зависимости дуантного напряжения от анодного напряжения мощных каскадов. Результаты измерений при двух различных коэффициентах усиления мощных каскадов генератора приведены на рис. 6.

В обоих случаях коэффициент η близок к нулю, что свидетельствует о достаточном подавлении лавины осциллирующих электронов.

Таким образом, искусственное покрытие кромок дуантов сажей может быть использовано для уменьшения времени тренировки циклотрона.

Обычно конструкция дуантов выполняется в виде двух плакировок, укрепленных на раме, и кромки плакировок образуют щель не только в ускоряющей промежутке, но и по всему периметру дуанта. Именно такая конструкция осуществлена в ускорителях У-300 и У-150/.

Авторами было предложено закрыть наружные щели медным листом с целью уменьшения поверхности, где возможно возникновение электронной лавины.

На рис. 7 приведены зависимости $U_g = f[U_a]$ для дуантов с открытыми и закрытыми щелями по наружному периметру. Как видно из рисунка, потери на электронную загрузку при закрытых щелях уменьшились до 7%. Кроме того, после ликвидации щелей возросла электрическая прочность зазора дуант-камера по наружному периметру дуанта.

Таким образом, существование электронной лавины, обусловленной наличием магнитного поля и провисанием электрического поля в щель между кромками дуантов, вполне удовлетворительно объясняет и появление дополнительного затухания в нетренированной вакуумной системе и сам процесс тренировки, приводящий к образованию слоя углерода на внутренних кромках дуанта.

В заключение можно отметить, что наблюдавшееся в $^{/4/}$ увеличение гамма-излучения циклотрона при включении магнитного поля вполне может быть объяснено возникновением описанной выше электронной лавины и дрейфом части осциллирующих электронов в высоковольтный промежуток дуант-камера.

Электронная загрузка осциллирующими электронами обязательно должна учитываться при конструировании дуантов. Конструкция должна содержать минимальное количество щелей, допускающих существование такого процесса, обеспечивая при этом необходимую скорость откачки полости дуантов.

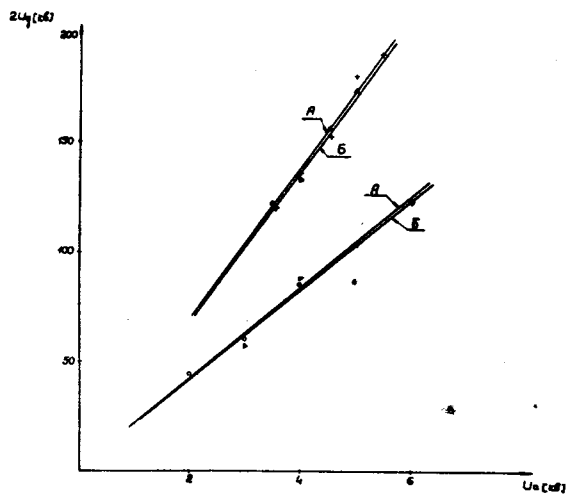


Рис. 6.

Электронная нагрузка резонатора циклотрона У-150 в случае искусственного покрытия кромок дуанта углеродом (сажей).

А - $H = 0$;

Б - $H \neq 0$; $t = 0$; $\eta \approx 0$.

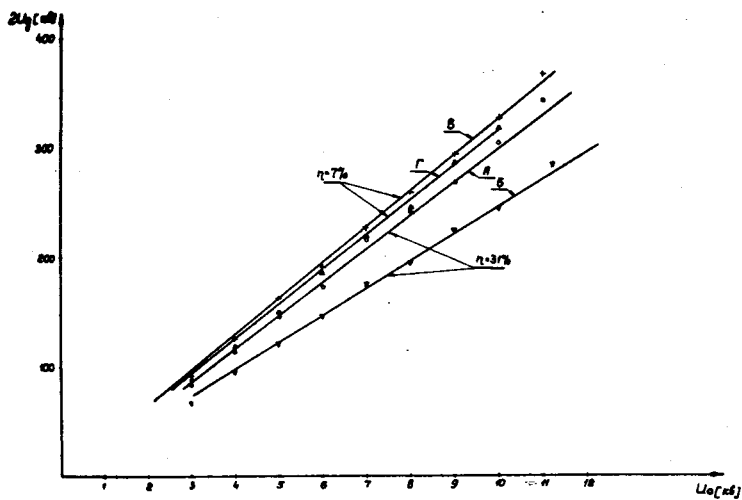


Рис. 7.

Влияние наружных щелей на электронную нагрузку резонатора циклотрона У-300.

А - щели открыты, $H = 0$;

Б - щели открыты; $H \neq 0$;

В - щели закрыты; $H = 0$;

Г - щели закрыты; $H \neq 0$.

Авторы благодарят профессора Г.Н. Флерова за интерес, проявленный к этой работе, и В.В. Батюню и В.П. Ковалева за помощь в проведении измерений на ускорителе У-150.

Л и т е р а т у р а

1. V.J.Vanhuyse. *Nuovo Cimento. Vol. X N 4 (1958).*
2. W.K.Mansfield. *Brit. Jour. of Appl. Phys. Vol. II N 10 (1960).*
3. Г. Брюннинг. "Физика и применение вторичной электронной эмиссии", "Советское радио", Москва 1958 г.
4. Г. Индреаш и др. "Исследование γ -лучей резонансной системы циклотрона". Препринт ОИЯИ Р-873, Дубна 1962 г.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 апреля 1962 года.