

По форме траектории заряженных частиц ускорители делятся на: а) линейные, в которых траектории частиц близки к прямой линии; б) циклические, в которых частицы под действием ведущего магнитного поля движутся по орбитам, близким к круговым.

По принципу ускорения, т.е. по характеру ускоряющего электрического поля, ускорители подразделяются на высоковольтные, индукционные и резонансные.

В высоковольтных ускорителях ускоряющее электрическое поле создаётся большой разностью потенциалов между электродами ускоряющего промежутка и действует в течении интервала времени значительно большего времени пролёта частицами всего пути ускорения. В таких ускорителях траектория частиц является прямолинейной.

В индукционных ускорителях ускорение частиц осуществляется с помощью вихревого электрического поля. Существуют линейные и циклические индукционные ускорители. Работа резонансных ускорителей основана на так называемом резонансном ускорении, при котором движение заряженных частиц происходит синхронно (в резонанс) с переменным ускоряющим электрическим полем. Частота этого поля может быть постоянной или монотонно изменяющейся. Резонансные ускорители делятся на линейные и циклические. Классификацию современных ускорителей можно представить в виде следующей таблицы.

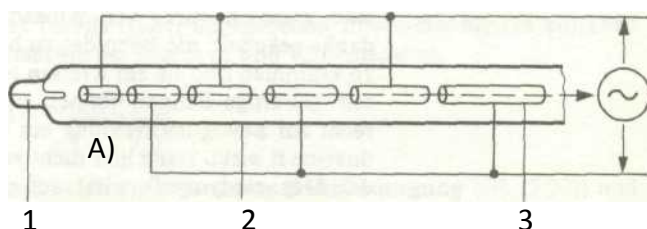
Таблица 1. Классификация ускорителей заряженных частиц.

По форме траектории частиц	По принципу ускорения			
	Высоковольтный ускоритель	Индукционный ускоритель	Резонансный ускоритель	
			Частота ускор. напряж. постоянна	Частота ускор. напряж. Монотонно изменяется
Линейный ускоритель	Электростатический ускоритель Каскадный ускор. Импульсный ускор.	Линейный индукционный ускоритель	Линейный резонансный ускоритель	
Циклический ускоритель			циклотрон микротрон	фазотрон
		Бетатрон	синхротрон	синхрофазотрон

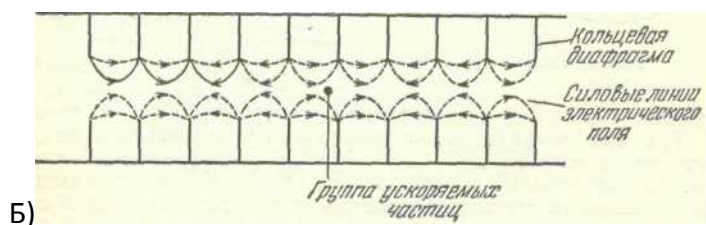
Нужно отметить, что каждый вид ускорителей в свою очередь делится на несколько типов. Например, электростатический ускоритель (ЭСУ) имеет следующий разновидности: открытый ЭСУ, ЭСУ под давлением, перезарядный ЭСУ. Синхрофазотроны подразделяются на слабофокусирующие и сильнофокусирующие и т.д.

Принцип действия (П.Д.)

Рассмотрим П.Д. линейного У, используя для этого следующий рисунок



1.Источник ионов 2. Ускоряющая система 3.Трубки дрейфа



Б)

Рис. 1 Схема линейного ускорителя

А) с трубками дрейфа, Б) с бегущей волной,

У. состоит из источника заряженных частиц и ряда электродов в виде металлических полых трубок. Все электроды расположены вдоль одной оси и присоединены через один к одноимённым клеммам генератора высокой частоты. В зазорах между электродами возникает электрическое поле того или иного направления попеременно. Если частица вылетает из источника в момент времени, когда электрическое поле было ускоряющим, то она, пройдя первый зазор, приобретает некоторую энергию и влетит внутрь первой трубки. Пролетая внутри трубки, частица не испытывает действия поля, т.к. металлические стенки надёжно её экранируют. Можно выбрать длину трубки т.о., чтобы дрейф частицы внутри трубки продолжался полпериода колебаний. Тогда за время прохождения трубки дрейфа поле во втором зазоре изменит знак и окажется ускоряющим для этой частицы. Пройдя второй зазор, частица опять увеличит E , и если следующая дрейфовая трубка имеет должную длину, то в третьем зазоре частица снова попадает в ускоряющее поле. Этот процесс может быть повторён много раз, и полная E , приобретённая частицей в такой системе, будет $= \sum \text{энергий}$, полученных частицей при прохождении каждого из зазоров. Очевидно, что длина трубок дрейфа должна возрастать с увеличением скорости частицы. В У. этого типа имеет место автофазировка, что и обеспечивает значительную интенсивность частиц на выходе. Однако необходимо принимать меры для удержания частиц в приосевой области (для

фокусировки пучка), с тем, чтобы избежать их потерь в процессе ускорения. Описанную схему применяют для ускорения тяжёлых частиц. Ускорение e^- эффективно осуществляется электромагнитной волной, бегущей в цилиндрическом волноводе. Внутри волновода, который представляет собой металлическую трубу с диафрагмами, создаётся бегущая электромагнитная волна с продольной компонентой электрического поля (рис. Б). Если электроны из источника попали в ускоряющую полуволну, то они начнут двигаться вдоль волновода. Можно сделать так, чтобы с ускорением скорости e^- синхронно увеличивалась и скорость электромагнитной волны, тогда электрон останется в одной и той же фазе волны. Увеличение скорости волны достигается изменением размеров металлических диафрагм с отверстием в центре, располагаемых внутри волновода. Конечная энергия таких e^- может быть определена при условии, что известны напряжённость поля волны и длина волновода.

Для сокращения малых поперечных размеров пучка e^- (т.е. для его фокусировки) применяют продольное постоянное магнитное поле. Известны и другие ускоряющие системы (волновод с диэлектриком, спираль и т.п.). Эти системы не получили широкого распространения и мы их рассматривать не будем.

Для питания линейных У. необходимо использовать мощные импульсные высокочастотные генераторы. Поэтому линейные У. также работают в импульсном режиме.

3

Большой интерес к линейным У. со стороны учёных вызван существенными преимуществами этих машин по сравнению с циклическими. К ним могут быть отнесены: **получение больших токов ускоренных частиц, возможность увеличения выходной Е присоединением дополнительных секций; простота ввода и вывода пучка.** Для электронных У. к этому добавляется **отсутствие потерь Е e^- на излучение и высокий коэффициент преобразования подводимой Е в энергию ускоренных частиц.** Определённым недостатком является значительная длина ЛУ на высокие энергии.

Прежде чем перейти к рассмотрению других типов У запишем некоторые расчётные формулы

Конечная максимальная энергия ионов

$$W_{\max} = N \Delta W = N q U_m$$

Где N -число трубок дрейфа; ΔW -приращение Е иона после прохождения каждого зазора;

q - заряд иона; U_m - амплитуда ускоряющего напряжения.

Определим примерную длину элементов ускоряющей системы состоящей из трубки дрейфа и зазора.

Длина n - го элемента

$$S_n = V_n \frac{T_0}{2} \quad \text{где } V_n - \text{ скорость иона в } n\text{-й трубке.}$$

Период T_0 ускоряющего напряжения U связан с длиной волны через скорость света (c) соотношением

$$T_0 = \lambda_0 / c$$

Тогда длина элемента определится выражением

$$S_n = \frac{V_n \lambda_0}{2c} = \frac{\beta_n \lambda_0}{2}$$

В этом выражении через β_n обозначено отношение скорости иона к скорости света.

Полученная формула позволяет рассчитать длину элементов ускоряющей системы ЛУ. Выразив скорость иона v_n через его кинетическую энергию w_n получим

$$W_n = m_0 v_n^2 / 2 \quad \text{или} \quad v_n = (2 w_n / m_0)^{1/2}.$$

Тогда
$$S_n = \frac{\lambda_0}{2c} \sqrt{\frac{2W_n}{m_0}}$$

Так как $W_n = n \Delta W$, то окончательно будем иметь

$$S_n = \frac{\lambda_0}{2c} \sqrt{\frac{2n \Delta W}{m_0}}$$

Из этого соотношения видно, что длина элементов ускоряющей системы должна увеличиться в $\sqrt{n}$, т.е. пропорционально корню квадратному их целых чисел. Именно поэтому с увеличением E ускорителя его длина сильно возрастает.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ (ЭСУ)

ЭСУ относится к классу высоковольтных ускорителей, в которых заряженные частицы приобретают энергию тем большую, чем больше пройденная разность потенциалов. Одной из основных проблем, возникающих при построении таких У, является создание значительной ускоряющей разности потенциалов.

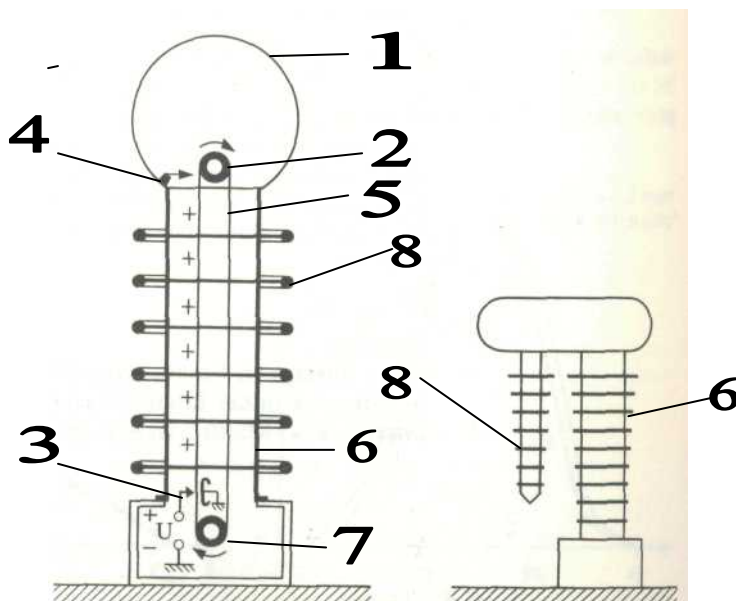
Принцип действия.

1й ЭСУ (на протяжении 80 кВ) был построен в 1929 г. Ван де Граафом. В его конструкции используется идея доведения до высокого потенциала изолированного проводящего электрода путём сообщения ему определённого заряда. Известно, что потенциал U изолированного электрода зависит от величины сообщенного ему заряда Q и выражается формулой $U = \frac{Q}{C}$, где C – ёмкость электрода. Из формулы следует, что потенциал электрода тем выше, чем больше его заряд. Если такой электрод, заряженный до высокого потенциала, использовать как ускоряющий, то при движении частиц с него

будет уходить часть заряда и потенциал его будет падать. Для поддержания постоянным потенциала необходимо всё время восполнять убыль заряда.

Т.о. , в конструкцию ЭСУ должны входить следующие основные элементы: высоковольтный электрод, опорная колонна, поддерживающая и надёжно изолирующая его; зарядное устройство которое непрерывно сообщает высоковольтному электроду заряд; ускорительная трубка, в которой происходит ускорение заряженных e^- или ионов.

СХЕМА ЭСУ



1. Высоковольтный электрод; 2,7. Валики ленточного транспортера; 3,4. Коронирующие гребенчатые электроды; 5. Ленточный транспортер; 6. Опорная колонна; 8. Ускорительная трубка.

Форма высоковольтного электрода имеет определяющее значение для достижения max потенциала при работе ускорителя в открытом помещении. Поскольку в этом случае высоковольтный электрод окружен воздухом при атмосферном давлении, допустимая напряженность эл. поля не должна превышать значения $E_{пр}$ при котором происходит пробой воздушного промежутка. Эта напряженность для воздуха составляет величину $E_{пр} \approx 3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$

Как известно, напряженность поля на поверхности заряженного проводящего тела в общем случае различна и зависит от кривизны поверхности. Чем меньше радиус кривизны, тем больше напряженность поля. В связи с этим, оптимальной является сферическая форма электрода, т.к. она обеспечивает равномерное распределение заряда и одинаковую напряженность эл. поля по всей поверхности. Величина напряженности определяется соотношением $E = U/R_0$ где U – потенциал, (в) R_0 – радиус шара, (м). Учитывая, что max напряженность поля не должна превышать $E_{пр}$, получаем соотношение, позволяющее рассчитать предельный потенциал: $U_{пред} = E_{пр} \cdot R_0$. Как видно, потенциал электрода, а следовательно и max достижимая ускоряющая разность потенциалов ЭСУ пропорциональна радиусу сферы и при $R_0 = 1 \text{ м}$ равна $U_{пред} = 3 \cdot 10^6 \text{ В}$

Практически достижимая разность потенциалов существенно меньше теоретически достижимой из-за неоднородностей поверхности электрода, краевых эффектов, обусловленных наличием в сфере отверстия, и влияния окружающих предметов.

В ЭСУ заряд сообщается высоковольтному электроду при помощи бесконечной движущейся ленты (транспортера) которая натянута на 2-х валиках. Один (7) валик находится обычно у основания изоляционной клонь и приводится во вращение от электромотора. Второй (опорный) валик (2) расположен внутри полого, высокопотенциального электрода. Материал ленты должен иметь значительную механическую прочность, высокие поверхностное и объемное сопротивления и большую электрическую прочность. Обычно ленту изготавливают из прорезиненной ткани толщиной 1,5-2 мм. У нижнего валика, в непосредственной близости от ленты находится гребенчатый электрод (3), перекрывающий её по ширине. Он соединен с полюсом источника постоянного напряжения U . Величину U , выбирают такой, чтобы между электродом и движущейся лентой возникал коронный разряд. При этом с гребенчатого электрода на ленту будет осаждаться заряд определенной величины с поверхностной плотностью σ Кл/м².

Поскольку высокопотенциальный электрод имеет заряд того же знака, что и заряженный участок ленты, при движении ленты будет затрачиваться работа на преодоление сил электрического поля, которая переходит в энергию этого поля.

6

Внутри электрода происходит снятие заряда с ленты. Разрядка заряженного участка ленты осуществляется также при помощи *гребенчатого электрода (4), расположенного вблизи движущейся ленты и соединенного электрически с внутренней поверхностью высокопотенциального электрода (1)*. Зарядный ток ЭСУ может быть вычислен по формуле $I = \Delta Q / \Delta t = b V \sigma$,

ΔQ – заряд, переносимый лентой за 1 цикл, Δt – длительность цикла, b и V соответственно ширина и скорость ленты.

Поскольку желательно получить возможно большой ток, необходимо увеличивать ширину ленты (b), скорость её движения (V) и поверхностную плотность заряда (σ)..

Но σ ограничена максимально допустимой напряженностью электрического поля (в воздухе $E_{пр} \approx 3 \cdot 10^6$ В/м). Т.О. максимальная поверхностная плотность заряда на ленте в воздухе ($\epsilon=1$) при 760 мм.рт. ст составляет $\sigma_{\max} = 2 \epsilon_0 E_{пр}$.

Ширина ленты и скорость её движения ограничивается прочностью материала, а также размерами ускорителя. При ширине ленты $b \approx 0,5$ м и скорости $V = 20$ м/сек максимальный ток $I_{\max} = 0,5$ мА.

ЭСУ, работающие на воздухе при атмосферном давлении для получения ускоряющей разности потенциалов $\approx 3 - 5$ МВ должны иметь гигантские размеры. Так, например, построенный в физико-техническом институте Украины и развивавший

Лекц. Стр. VII

напряжение до 3-4 МВ, имел почти сферический высоковольтный электрод диаметром 10 м и изолирующие опорные колонны высотой 10 м. Достигнутое максимальное напряжение ограничивалось разрядами на стены и потолок зала, в котором был расположен генератор.