

Равновесная частица с зарядом  $q$  при пролёте  $j$ -го периода ускорения приобретает энергию

$$\Delta w_j = q T_g E_0 l_{yj} \cos \varphi_r. \quad (8)$$

Здесь  $E_0$  — амплитуда усреднённого по периоду  $l_{yj}$  электрич. поля,  $T_g$  — коэф. пролётного времени, учитывающий влияние конечных размеров зазора и канала

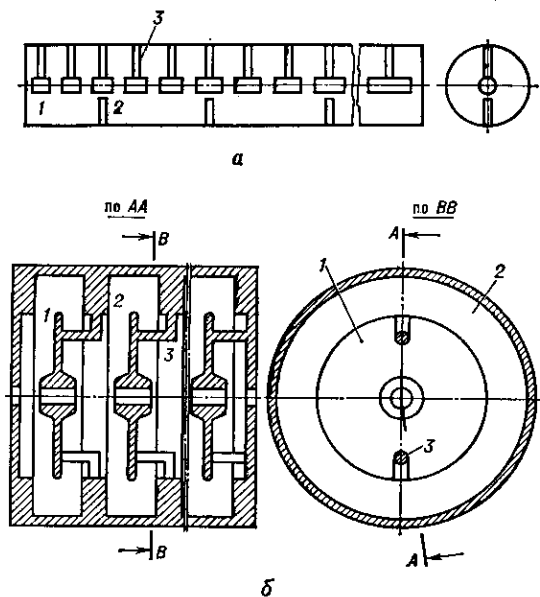


Рис. 5. Типы ускоряющих структур на стоячей волне: а — резонатор с трубками дрейфа 1 и стабилизирующими стержнями 2 (3 — штанги трубок дрейфа); б — резонатор волноводного типа — ускоряющая структура с проводящими шайбами 1 и диафрагмами 2 (3 — штанги крепления шайб).

дрейфовой трубки ( $T_g < 1$ ). Если ускоритель содержит  $N$  периодов ускорения, то равновесная частица полу-

чит общее приращение энергии  $\Delta \omega = \sum_{j=1}^N \Delta w_j$ . Благодаря

механизму автофазировки равновесная фаза располагается на восходящем участке кривой изменения (во времени) напряжения в зазоре. В этом случае величина поля при пролёте частицей зазора растёт и поле оказывает дефокусирующее действие на пучок. Этот эффект учитывается при расчёте фокусирующей системы, к-рая является одной из основных в ускорителе.

Хотя в каждом из описанных типов резонансных Л. у. принципиально можно ускорять любые заряд. частицы, обычно на бегущих волнах ускоряются лишь электроны, а для всех тяжёлых частиц, включая протоны, используются, как правило, Л. у. на стоячих волнах. Ускорение протонов и ионов на стоячей волне вызвано рядом причин, главная из к-рых связана с малой скоростью этих частиц (из-за их большой массы) на нач. участке ускорения ( $\beta \leq 0,03-0,4$ ). Реализация ускоряющей структуры, обеспечивающей сильное замедление синхронной с частицей волны, равномерное распределение ускоряющего поля по сечению апертуры и размещение фокусирующих линз, становится возможной лишь при использовании резонаторов, работающих в метровом диапазоне волн (для протонных Л. у.  $\lambda = 1,5-2$  м, для тяжёлых ионов  $\lambda$  до 12 м). Поскольку в процессе ускорения  $\beta$  увеличивается, то на последующих участках ускорения рабочую частоту, как правило, повышают (напр., при  $\beta > 0,4$ ).

Линейный ускоритель протонов (ЛУП). Идея создания ЛУП была высказана Г. Изингом (G. Ising) и впервые реализована в 1928 Р. Видероэ (R. Wideröe)

по схеме, описанной выше (рис. 4). Протонные Л. у. можно разбить на две группы, существенно отличающиеся по схеме построения и характеристикам пучков. К первой группе в осн. относятся ускорители-инжекторы крупных протонных синхротронов. Они характеризуются след. данными: энергия протонов до 200 МэВ, импульсный ток до 100—300 мА, амплитуда  $\sim 1$  см·мрад, относит. разброс по энергиям  $\sim 10^{-3}$ , ср. ток — от долей до единиц мкА. ЛУП работает в импульсном режиме — длительность импульсов пучка протонов не превышает 100 нс, частота повторения равна частоте повторения циклов ускорения протонного синхротрона (до 1 импульса в секунду). Все ускорители этой группы построены на основе ускоряющей структуры, представляющей собой цилиндрич. резонатор, нагруженный трубками дрейфа (рис. 5, а). В резонаторе возбуждается стоячая волна типа  $E_{010}$ . Фокусировка пучка осуществляется квадрупольными эл. магн. линзами, размещёнными в трубках дрейфа. Каждый резонатор возбуждается от отдельного лампового многокаскадного усилителя мощности (канал ВЧ-питания) на частоте 150 или 200 МГц. На входы усилителей колебания подаются от общего высокостабильного задающего генератора. Настройку резонаторов в резонанс и стабилизацию амплитуд и фаз ВЧ-полей в резонаторах осуществляют системы автоматич. регулирования. Инжектором служит высоковольтный ускоритель, в к-ром протоны предварительно ускоряются до энергии 500—750 кэВ. Для повышения захвата протонов в режим ускорения на входе ЛУП устанавливается группирователь клистронного типа. Обычно коэф. захвата равен 0,6—0,8. Темп ускорения протонов лежит в пределах 1—1,2 МэВ на 1 м длины.

Ко второй группе относятся новейшие наиб. крупные Л. у., ускоряющие протонные пучки до энергий в неск. сотен МэВ при больших ср. токах. Один из таких ускорителей работает в Лос-Аламосе (США, энергия 800 МэВ, ср. ток пучка 1 мА), другой сооружается для Академии наук СССР в Москве (энергия 600 МэВ, ср. ток 0,5—1 мА; см. табл. 1). Оба Л. у. являются осн. установками ускорительно-накопич. комплексов физики ср. энергий, носящих назв. «мезонные фабрики». Ускорители рассчитаны на ускорение протонов и отрицат. ионов водорода  $H^-$  (в т. ч. и на их одноврем. ускорение). Построение Л. у. этой группы существенно отличается от построения инжекторов. Для примера опишем схему Л. у. для московской мезонной фабрики. Она состоит из двух частей. В первой части протоны и ионы  $H^-$  ускоряются до энергии 100 МэВ в ускорит. канале, состоящем из 5 резонаторов с трубками дрейфа. Эта часть ускорителя работает на частоте  $f_1 = 198$  МГц и строится аналогично Л. у. первой группы. Дальнейшее ускорение от 100 МэВ до 600 МэВ производится во второй (основной) части ускорит. тракта, состоящей из 28 резонаторов, представляющих собой цепочки несвязанных резонаторов (рис. 5, б). Резонаторы на этом участке работают на более высокой частоте  $f_2 = 990$  МГц, кратной  $f_1$ . Фокусировка пучка осуществляется с помощью дублетов из квадрупольных электромагнитов, установленных между резонаторами и их секциями. Поскольку при переходе из первой части во вторую скачком меняется длина периода фокусировки, то для уменьшения возрастания радиуса пучка на переходе включено согласующее устройство по поперечному движению, состоящее из ряда квадрупольных линз с раздельной регулировкой в них магн. поля. Ускоритель имеет общий задающий генератор со стабилизиров. частотой. В каждом канале ВЧ-питания включены прецизионные системы автоматич. регулирования, стабилизирующие ускоряющие ВЧ-поля и осуществляющие настройку резонаторов в резонанс. Стабильность ВЧ-полей составляет по амплитуде  $\pm 1\%$  и по фазе  $\sim 1^\circ$ , стабильность настройки резонатора  $\sim 10^{-7}$ . По аналогичной схеме построен и Л. у. в Лос-Аламосе.