

током. Конфигурация магн. поля в бетатроне должна подчиняться двум условиям: 1) магн. индукция на центр. орбите должна соответствовать изменяющейся энергии электронов; 2) конфигурация магн. поля в вакуумной камере должна обеспечивать устойчивость поперечного движения электронов или, как говорят, устойчивость их *бетатронных колебаний* (см. ниже). Расположенные выше и ниже камеры кольцеобразные скользящие магн. полюсы создают необходимое для такой устойчивости поле, спадающее к периферии (рис. 8, б).

Идея бетатронного метода ускорения высказана в 1922 Дж. Слепяном (J. Slepian), основы теории развиты в 1948 Р. Видероз (R. Wideröe). Первый бетатрон построен в 1940. Простота и надёжность бетатронов обеспечили их широкое применение в технике и медицине (в области энергий 20—50 МэВ).

В линейных индукционных ускорителях силовые линии электрич. поля (с напряжённостью  $E$ ) направлены вдоль оси ускорителя. Электрич. поле индуцируется изменяющимся во времени магн. потоком, проходящим через расположенные друг за другом кольцевые ферритовые индукторы 1 (рис. 3). Магн. поток возбуждается в них корот-

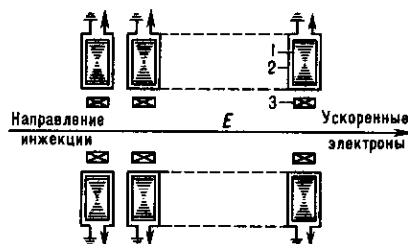


Рис. 3. Схема устройства линейного индукционного ускорителя: 1 — сердечник индуктора; 2 — возбуждающая обмотка; 3 — фокусирующая катушка.

кими (десятки или сотни нс) импульсами тока, пропускаемыми через одновитковые обмотки 2, охватывающие индукторы. Фокусировка производится продольным магн. полем, к-рое создаётся катушками 3, расположенными внутри индукторов. Линейные индукционные У. позволяют получать в импульсе рекордные (килоамперные) токи; наиб. мощный из работающих У. — АТА (США) — ускоряет электроны до энергии 43 МэВ при токе 10 кА. Длительность токовых импульсов 50 нс.

**Резонансные ускорители.** В резонансных У. для увеличения энергии заряд. частиц используются ВЧ продольные электрич. поля. Ускорение в таких полях возможно при выполнении одного из двух условий: либо ускоряемые частицы должны двигаться вместе с эл.-магн. волной, сохраняя своё положение относительно неё (ускорители с бегущей волной), либо они должны взаимодействовать с ней только в такие моменты времени, когда электрич. поле имеет нужное (ускоряющее) направление и нужную величину (собственно резонансные У.). Участки, на к-рых происходит взаимодействие частиц с ускоряющим полем, наз. ускоряющими зазорами или ускоряющими промежутками. На остальной части пути частицы не испытывают действия ВЧ-поля либо потому, что его там просто нет, либо потому, что частицы защищены от него экранами.

У. с бегущей волной применяют в осн. для ускорения лёгких частиц (электронов и позитронов), скорость к-рых уже при небольших энергиях мало отличается от скорости света. Фазовая скорость эл.-магн. волн в вакуумных волноводах всегда превышает скорость света; нагружая волноводы системой перфорир. диафрагм, можно замедлить скорость волны, но не очень сильно. Поэтому для ускорения медленных частиц У. с бегущей волной не применяют.

**Линейные резонансные ускорители.** Простейший резонансный У. — ускоритель Видероз (рис. 4). Расстав-

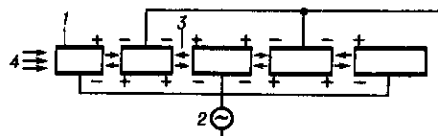


Рис. 4. Схема устройства ускорителя Видероз: 1 — пролетные трубки; 2 — генератор ВЧ-колебаний; 3 — ускоряющие зазоры; 4 — пучок.

ляются (через одну) к полюсам ВЧ-генератора. В ускоряющих зазорах (промежутках между противоположно заряженными пролетными трубками) создаётся продольное электрич. ВЧ-поле с напряжением порядка сотен кВ. Частицы, подходящие к ускоряющему зазору в нужный момент времени, ускоряются электрич. полем, а затем «спрячутся» в очередную пролетную трубку. Её длина и скорость частицы согласованы между собой так, что к очередному зазору частицы подходят в тот момент времени, когда электрич. поле имеет правильное направление и величину, т. е. ту же фазу, что и в предыдущем ускоряющем зазоре. Для этого необходимо, чтобы выполнялось условие

$$l = \left(n + \frac{1}{2}\right) \beta \lambda, \quad (1)$$

где  $l$  — длина трубки и ускоряющего промежутка;  $\beta$  — скорость частицы, выраженная в долях скорости света  $c$ ;  $\lambda$  — длина волны эл.-магн. колебаний (в пустоте);  $n$  — любое целое число. Ускоренный пучок состоит, т. о., из цепочки сгустков частиц (банчей), прошедших через ускоряющие зазоры при надлежащей фазе колебаний электрич. поля. При разработке структуры линейного У. важно правильно выбрать длины не только пролетных трубок, но и ускоряющих зазоров. Эти длины должны быть, с одной стороны, достаточно велики, чтобы выдерживать заметные напряжения (сотни кВ, а иногда и мегавольты), а с другой — достаточно малы, чтобы фаза ВЧ-колебаний за время прохождения частицы менялась не слишком сильно.

При увеличении скорости частиц ускорители Видероз становятся неэффективными и уступают место ускорителям Альвареса. В них пролетные трубки не соединяются к генератору, а располагаются друг за другом внутри длинного цилиндрич. резонатора, в к-ром возбуждаются эл.-магн. колебания. ВЧ-поле, к-рое вдали от пролетных трубок распределено так же, как в обычном резонаторе, у его оси концентрируется в ускоряющих зазорах. Схема расположения элементов «ускоряющий зазор — пролетная трубка — ускоряющий зазор» и т. д. остаётся той же, что и в ускорителях Видероз, но условие (1) принимает вид

$$l = n \beta \lambda. \quad (2)$$

Линейные резонансные У. эффективно работают, если в них инжектируются достаточно быстрые частицы, предварительно ускоренные с помощью У. прямого действия или с помощью У. со знакопеременной высокочастотной фокусировкой.

**Циклотроны** — простейшие и исторически первые У. циклич. типа (рис. 5). В совр. понимании циклотронами называются резонансные циклич. У., работающие при не меняющемся во времени ведущем магн. поле и при пост. частоте ускоряющего ВЧ-поля. В обычных циклотронах магн. поле обладает азимутальной симметрией и почти не зависит от радиуса; траектории ускоряемых частиц имеют вид раскручивающихся спиралей. Обычные циклотроны применяют для ускорения тяжёлых нерелятивистских частиц — протонов и ионов. Вакуумная камера циклотронов ограничена внеш. стенкой цилиндрич. формы и двумя плоскими горизонтально расположенными крышками. Полюсы электромагнита обычных циклотронов создают в камере почти однородное (слегка спадающее к периферии)