

нения периода магн. поля, его величины, тока пучка и периода дробления пучка.

**Волновые ускорители.** Это направление является развитием предложения о плазменных волноводах. В электронном пучке, распространяющемся в вакууме и удерживаемом продольным магн. полем  $H$ , возбуждается и используется для ускорения ионов волна пространств. заряда с отрицат. энергией, т. е. волна, для к-рой характерно увеличение амплитуды ускоряющего ионы поля по мере затраты энергии на ускорение ионов (рис. 2). Проведены два демонстрац. эксперимента, показавшие возможность возбуждения и управления такой волной. В экспериментах исполь-

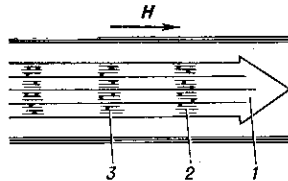


Рис. 2. Ускорение медленной волной в пучке: 1 — электронный пучок; 2 — медленная волна; 3 — ионы, захваченные волной.

зовались волны разной физ. природы: циклотронная [5] и ленгмюровская [6], обладающие отрицат. энергией. Для волновых ускорителей наиб. сложным является получение низких нач. фазовых скоростей волны, необходимых для инжекции ионов в потенц. яму волны. В опытах с циклотронными волнами для этого используют низшую циклотронную моду. Для её возбуждения применяют спиральную секцию, резонансно возбуждаемую на круговой частоте  $\omega_0$ . При этом фазовая скорость возбуждаемой в пучке волны равна

$$v_{\Phi} = \frac{v_e}{1 + eB/\gamma mc\omega_0}, \quad (2)$$

где  $v_e$  — скорость электронов,  $eB/\gamma mc = \Omega$  — циклотронная частота ( $e$  и  $m$  — величина заряда и масса электрона,  $B$  — магн. индукция). Создавая сильное магн. поле (большие значения  $\Omega$ ) и выбирая сравнительно низкую частоту  $\omega_0$ , фазовую скорость вначале можно сделать достаточно малой для захвата ионов в режим ускорения. Последующее увеличение фазовой скорости осуществляется за счёт уменьшения магн. поля по длине ускорения. [Для аналогичного ускорителя с ленгмюровскими волнами параметром, меняющим фазовую скорость, является плазменная частота, к-рую можно регулировать изменением геом. фактора (напр., расстояния от пучка до стенки трубы дрейфа).] Ниже приведены рассчитанные в [5] параметры строящегося ускорителя такого типа.

Энергия электронного пучка . . . . .	— 3 МэВ
Ток электронного пучка в импульсе . . . . .	— 30 кА
Длительность импульса тока пучка . . . . .	— 200 нс
Частота циклотронной волны . . . . .	— 250 МГц
Магнитная индукция по длине . . . . .	— 25 кГс — 2 кГс
Энергия ионов . . . . .	— 30 МэВ
Ток ионов в импульсе . . . . .	— 30 А
Длина ускорителя . . . . .	— 4 м

Точности поддержания параметров для обеспечения синхронизации во всё время ускорения очень высоки, и это определяет сложность реализации ускорителя.

**Ускорители с электронными кольцами** используют для ускорения и удержания ионов потенциальную яму специально сформированного кольца релятивистских электронов. Метод был предложен в ОИЯИ (Дубна) в 1967 [7].

В плотном электронном сгустке электрич. поле на границе определяется плотностью числа электронов  $\rho$  и размерами сгустка  $a$ , т. е. пропорционально  $\rho/a$ . В центре сгустка поле равно нулю, и, т. о., сгусток образует потенц. яму. Помещённый в такой сгусток положит. ион с зарядом  $Ze$  и массой  $M$  будет испытывать действие силы поля сгустка, направленное к его центру, и совершать колебат. движения. Ион удерживается потенц. ямой электронного сгустка. Если под действием внеш. сил электронный сгусток начнёт дви-

гаться с ускорением  $w$ , то силы инерции, действующие на ион,  $Mw$ , будут направлены противоположно силам удержания. Если сгусток электронов и внеш. силы, определяющие ускорение, выбраны правильно:  $eZ\rho/a > Mw$ , то ион движется вместе со сгустком, т. е. скорости сгустка и иона в среднем совпадают. При этом приобретённые энергии электронов и ионов будут соотноситься (при одинаковых скоростях) как массы частиц:  $M/m$ . Даже для самого лёгкого из ионов — протона это отношение равно 1840, для остальных ионов оно в  $A$  раз больше ( $A$  — атомный номер элемента). Такой большой выигрыш в энергии иона делает реализацию данного метода весьма перспективной. В приведённых рассуждениях предполагалось сохранение первонач. размеров сгустка электронов, что обеспечивает непрерывность процесса ускорения. Одним из отличий этого метода ускорения от других К. м. у. является то, что среди условий, наложенных на сгусток, есть условие сохранения его размеров (также за счёт собств. полей). Всем условиям, наложенным на сгусток, удовлетворяет образование в виде компактного кольца релятивистских электронов, движущихся в магн. поле, в сечении к-рого находятся покоящиеся ионы. Число ионов выбрано так, что удовлетворяется условие самофокусировки:  $N_e/\gamma^2 < N_i < N_e$ , где  $N_i$  и  $N_e$  — соответственно число ионов и электронов в кольце. Если  $\gamma \gg 1$ , то имеются широкие возможности выполнения этого соотношения. Варьируя число ионов, можно обеспечить в ускорителе как условия набора энергии ионами, так и достаточно большое количество ионов в одном кольце. Для прототилов ускорителей такого вида величина  $\gamma$  выбрана равной 30—40. При этом, естественно, как во всех К. м. у., необходимо иметь достаточно плотность электронов в кольце — именно это определяет большую эффективность ускорения. Напряжённость электрич. поля на границе сечения кольцевого сгустка равна:

$$E = \frac{N_e e}{\pi R a},$$

где  $R$  — радиус кольца,  $a$  — радиус его сечения.

Принцип работы такого ускорителя и реальные его параметры рассмотрим на примере конкретной схемы ускорителя ОИЯИ [8]. Инжектором электронов служит индукц. линейный ускоритель, позволяющий получать сравнительно высокие импульсные токи электронов (неск. кА) с малым разбросом частиц по

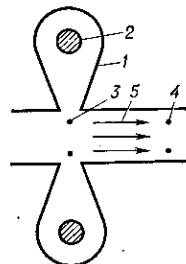


Рис. 3. Ускорение электронными кольцами: 1 — адгезатор; 2 — сечение кольца электронов до сжатия; 3 — сжатое электронное кольцо; 4 — ускоренное электронное кольцо; 5 — ускоряющее поле.

энергиям, что существенно для получения плотных сгустков. Инжекция и захват электронов на замкнутую орбиту происходят в магн. поле т. н. адгезатора — адиабатич. генератора заряд. тороидов. В адгезаторе формируется компактное кольцо электронов за счёт адиабатич. (медленного по сравнению с периодом обращения электронов) сжатия в растущем магн. поле. При этом  $R$  и  $a$  кольца (так же, как в бетатроне с переменным радиусом) изменяются обратно пропорционально  $\sqrt{B}$  (рис. 3). Энергия электронов, а следовательно, и фактор  $\gamma$  увеличиваются пропорционально  $\sqrt{B}$ . Для конкретного ускорителя после сжатия в адгезаторе:  $N_e = 10^{13}$ ,  $R = 3$  см,  $a = 0,15$  см,  $\gamma = 35$ , что обеспечивает поле на границе кольца  $10^6$  В/см. В этом состоянии источник нейтральных атомов (напр., водорода) формирует их поток сквозь электронное кольцо. Электроны ионизуют проходящий сквозь кольцо газ, и образовавшиеся ионы автоматически попадают в