

Рис. 6. Различные схемы линейных ускорителей тяжёлых ионов.

Ускорение тяжёлых ионов может быть и на линейных ускорителях (рис. 6). Наиб. совр. конструкцией «классического» линейного ускорителя является ускоритель UNILAC (Германия, Дармштадт), на котором получены пучки разл. ионов от ^{14}N до ^{238}U с макс. энергией 20 МэВ/нуклон и интенсивностями $(10^{13} - 2 \cdot 10^{11}) \text{ с}^{-1}$. Ионы, вытягиваемые из источника, сначала ускоряются эл.-статич. инжектором, а после банчировки — ВЧ-структурой Видероз, на выходе к-рой ионы приобретают энергию 1,4 МэВ/нуклон. Далее, пройдя через обдирочную мишень, ионы увеличивают свой первонач. заряд в 3—4 раза и ускоряются 4 ВЧ-секциями Альвареца до энергии 11,4 МэВ/нуклон. Поскольку ускорители Видероз и Альвареца работают на фиксированной частоте, энергия ускоренных ионов постоянна. Для её изменения используются 17 независимо сфазированных одноазорных резонаторов, к-рые дают возможность получать пучки ионов от 2 до 20 МэВ/нуклон. Длина ускорителя UNILAC равна 112 м, потребляемая импульсная мощность 34 МВт (ср. мощность ≥ 8 МВт). Сущест. повышение энергии ионов представляет серьёзную техн. проблему и связано со значит. увеличением мощности питания. Предел интенсивности ускоренного пучка определяется возможностями первой ступени, где при высоких плотностях тока пучка и относительно низкой энергии ионов весьма значительно кулоновское расталкивание. Это ограничение может быть ослаблено, если в качестве начального использовать линейный ускоритель с ВЧ квадрупольной фокусировкой (RFQ-структура). Другой разновидностью линейных ускорителей является ускоритель с варьируемой частотой RILAC, состоящий из 6 четвертьволновых резонаторов, частота к-рых изменяется от 17 до 45 МГц и к-рые обеспечивают суммарный ускоряющий потенциал 20 МВ. Величина потребляемой ВЧ мощности составляет 400 кВт на ниж. частоте и 1200 кВт на верхней. На RILAC получены пучки ускоренных ионов от ^{14}N до ^{129}Xe с энергиями (4—0,8) МэВ/нуклон и интенсивностями $(6 \cdot 10^{13} - 10^{12}) \text{ с}^{-1}$. Дальнейшее повышение энергии в линейных ускорителях такого типа связано со значит. увеличением ВЧ-мощности, что делает ускорение пучка до более высоких энергий нерациональным.

Кроме описанных установок для ускорения тяжёлых ионов реализованы и др. схемы. В них в качестве первой ступени используется эл.-статич. ускоритель, пучок к-рого после обдирки инжектируется и ускоряется отдельными, независимо сфазированными ВЧ-резонаторами (обычными или сверхпроводящими). По сравнению с обычными резонаторами, темп ускорения у к-рых ~ 1 МВ/м, сверхпроводящие позволяют реализовать более эффективное ускорение (до 5 МВ/м). В ускорителях такого типа конечная энергия определяется количеством ВЧ-резонаторов, а интенсивность пучка ограничена возможностями инжектора и для ионов ср. масс не превышает 10^{10} с^{-1} . Увеличить интенсивность пучка можно заменой эл.-статич. ускорителя на линейный с RFQ-структурой, что позволяет

ускорить относительно интенсивные пучки до энергий, достаточных для ввода и дальнейшего ускорения системой одиночных резонаторов. Зависимость макс. кинетич. энергии тяжёлых ионов от массы для нек-рых линейных ускорителей представлена на рис. 7.

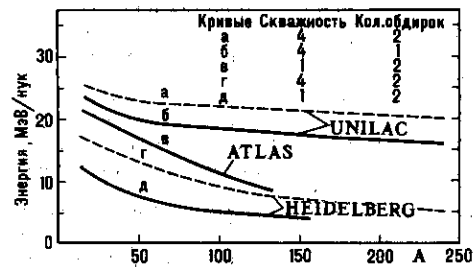


Рис. 7. Зависимость максимальной кинетической энергии тяжёлых ионов от массы для различных линейных ускорителей.

Будущее развитие линейных ускорителей связано с их использованием в качестве инжекторов в синхротроны или накопители тяжёлых ионов, для к-рых применение RFQ-структур позволит получать большие импульсные интенсивности ускоренного пучка.

Циклотронный метод ускорения тяжёлых ионов. Этот метод при сравнительно разумных затратах даёт возможность получать интенсивные пучки тяжёлых ионов достаточно высоких энергий (сотни МэВ/нуклон) в широком диапазоне масс (вплоть до урана) и с хорошим качеством ($\Delta E/E < 10^{-3}$, эмиттанс пучка в обеих плоскостях $\leq 5 \mu\text{ м} \cdot \text{мрад}$). Для циклотрона принципиально существуют прямой метод ускорения ионов, при к-ром заряд частицы из ионного источника остаётся постоянным в процессе всего цикла ускорения, и каскадный способ ускорения со скачкообразным увеличением заряда частицы за счёт обдирки на каждом этапе. Интенсивность пучков при прямом ускорении ионов целиком определяется интенсивностью высокозарядных ионов, полученных из источника, а энергия ионов определяется величиной магн. жёсткости (размерами установки). При каскадном методе ускорения ионы с относительно низким зарядом (и, следовательно, высокой интенсивностью) ускоряются до предел. энергии (наиб. оптимальна энергия 1—2 МэВ/нуклон) и после обдирки на мишени (однократной или многократной), увеличив свой заряд, поступают в дальнейшее ускорение. Поскольку предускоритель рассчитан на относительно низкую энергию, а осн. прирост энергии частицы приобретают, обладая высоким зарядом, каскадный метод ускорения (рис. 8) представляется достаточно оптималь-

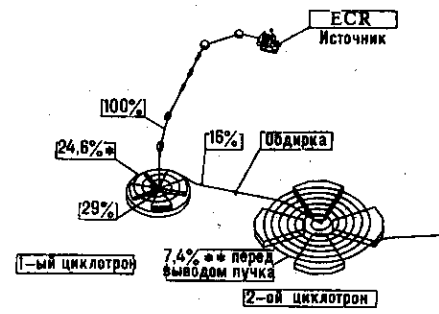


Рис. 8. Схема каскадного способа ускорения тяжёлых ионов в циклотроне.

ным для получения высокой энергии пучка (интенсивность пучка с конечной энергией в значит. степени определяется возможностями инжектора). В связи с большим прогрессом в создании источников высокозарядных ионов (особенно ECR-типа) трудно однозначно предпочтительно