

Табл. 1.—Крупнейшие линейные ускорители протонов

Местонахождение, назначение	Год запуска	Энергия, МэВ	Число резонаторов	Длина, м	Длительность импульса пучка, мкс	Импульсный ток пучка, мА	Средний ток пучка, мА
Серпухов (СССР), инжектор	1967	100	3	80	60	100	10^{-2}
Батейния (США), инжектор	1970	200	9	150	100	100—300	10^{-2}
Лос-Аламос (США), мезонная фабрика	1972	800	4+44	800	500	17	1
Москва (СССР), мезонная фабрика	строится	600	5+28	450	100	50	0,5—1

Построение ускорит. тракта из двух частей вызвано след. причинами. На энергии до 100 МэВ мощность наиб. экономно расходуется в резонаторах с трубками дрейфа. С увеличением скорости частиц эффективность этой ускоряющей структуры падает (из-за возрастания ВЧ-потерь в её стенках), и при энергиях >100 МэВ становится более экономичным применение структуры типа цепочки связанных резонаторов. Переход на эту ускорит. структуру даёт и ещё ряд преимуществ: уменьшаются габариты структуры и её масса. Кроме того, на частоте f_2 в качестве усилителей мощности применяются клистроны, что упрощает систему ВЧ-питания второй части ускорителя и повышает надёжность.

Характерной особенностью ускорителей второй группы является большой ср. ток пучка. Это накладывает жёсткие требования на потери частиц пучка при ускорении. Интегральная величина потерь не должна превышать 0,01% от выходного тока пучка. Для уменьшения потерь предусмотрен ряд мер: на входе производится фильтрация поперечного эмиттанта пучка с целью очищения пучка от ореола; при переходе от первой части ускорит. тракта ко второй шестимерный фазовый объём пучка дополнительно согласовывается с последующим ускорительно-фокусирующим каналом; там же подавляются когерентные колебания частиц в пучке с помощью спец. системы автоматич. регулирования. Управление ускорителем осуществляется от ЭВМ.

Осн. направления дальнейшего развития ЛУП связываются с повышением импульсных и особенно ср. токов пучков. Проектируемые сильноточные ЛУП след. поколения предназначаются для ускорения пучков с током 0,3—1,0 А до энергии порядка 1 ГэВ в непрерывном режиме. В них предполагается применить осн. принципы построения, заложенные в ЛУП для мезонных фабрик. На пути их реализации стоят сложные проблемы, в т. ч. комплексные проблемы обеспечения экономичности, надёжности и радиац. чистоты ускорителя. Снижение потерь пучка до уровня $\sim 10^{-5}$ позволило бы обслуживать ускоритель без манипуляторов.

Ведутся разработки сильноточных протонных и ионных источников непрерывного режима с повышенной фазовой плотностью пучков (под фазовой плотностью понимается отношение тока пучка к эмиттансу). Исследуются вопросы резонансного ускорения сильноточных пучков при пониженных энергиях инжекции (ускоряюще-фокусирующие структуры с квадрупольными

составляющими ВЧ-полей, малогабаритные резонаторы со сверхпроводящими фокусирующими соленоидными и т. д.). Разработаны конструкции квадрупольных линз на пост. магнитах (сплавы самарий—кобальт). Созданы усилит. клистроны непрерывного режима с выходной мощностью 1 МВт и кнд, равным 70%, и т. п.

Линейный ускоритель электронов (ЛУЭ). В нём используется, как правило, резонансное ускорение на бегущей эл.-магн. волне. Сущест. преимущество ЛУЭ по сравнению с циклич. ускорителями — почти полное отсутствие излучения электронов вследствие практич. постоянства их скорости по величине и направлению на осн. части ускорителя. Поэтому именно в них целесообразно ускорять электроны вплоть до сверхвысоких энергий. Энергия действующих ЛУЭ лежит в пределах от единиц МэВ до 21,5 ГэВ. В СССР и США рассматриваются проекты линейных ускорителей электронов и позитронов на энергии 150—200 ГэВ для линейных коллайдеров (установок с линейными встречными пучками). Данные крупнейших ЛУЭ представлены в табл. 2.

На схему построения ЛУЭ оказывают влияние особенности динамики электронных пучков, связанные с близостью скорости электронов на осн. части ускорителя к скорости света: изменение энергии электрона не приводит к изменению скорости, а следовательно, не работает механизм автофазировки. Облегчаются требования к фокусировке пучка, т. к., с одной стороны, поперечное кулоновское расталкивание в пучке почти полностью компенсируется магн. притяжением параллельных токов, с другой — случайные поперечные скорости v_{\perp} электронов в пучке убывают с ростом их энергии (поперечный импульс mv_{\perp} постояен, а масса m растёт). Типовая схема ЛУЭ включает в себя инжектор, группирователь и одну или неск. ускоряющих секций, возбуждаемых от СВЧ-генератора. Рабочая длина волны обычно 3—30 см. Темп ускорения — от неск. единиц до 10—15 МэВ на 1 м. Макс. длина ускоряющей секции зависит от выходной мощности генератора и интенсивности пучка. Кол-во секций и каналов их возбуждения зависит от требуемой энергии пучка. В малых ЛУЭ, широко применяемых для исследований по ядерной физике и для прикладных целей, генераторами служат магнетроны. В ЛУЭ, состоящих из неск. секций, в качестве генераторов используются усилит. клистроны, имеющие общий, стабильный по частоте

Табл. 2.—Крупнейшие линейные ускорители электронов

Местонахождение	Год запуска	Энергия, МэВ	Число ускоряющих секций	Общая длина, м	Длительность импульса, мкс	Импульсный ток пучка, мА	Частота повторения, Гц	Число каналов ВЧ-питания и мощность, МВт	Частота поля, МГц
Харьков (СССР)	1964	1800	49	240	1,4	24	50	50×20	2797
Станфорд (США)	1966	21 500 *	960	3050	1,6	42	360	240×24	2856
Он-Ридж (США)	1969	140	4	22,5	0,007	18,5×10 ⁸	1000	4×24	1300
Москва (СССР)	1969	60	6	12	до 5,5	10 ⁸	50—900	6×20	1818

* Ведутся работы по повышению энергии ускоренных электронов до 50 ГэВ.