

ЭЛЕКТРОННО-ПОЗИТРОННЫЙ СИНХРОТРОН С РАЗМНОЖЕНИЕМ ЧАСТИЦ

А. И. АЛИХАНИЯН, Ю. Ф. ОРЛОВ, А. И. БАРЫШЕВ, С. К. ЕСИН,
К. А. ИСПИРЯН, И. П. КАРАБЕКОВ, Г. Г. МАНАСЯН, В. М. ХАРИТОНОВ,
С. А. ХЕИФЕЦ, В. А. ХОЗЕ, В. П. НАДГОРНЫЙ, И. И. ФИНКЕЛЬШТЕЙН,
Ю. А. СВИСТУНОВ, А. А. ВАРФОЛОМЕЕВ, В. Е. НОВАК

Ереванский физический институт, СССР

Докладчик Ю. Ф. Орлов

I. Основные параметры ускорителей на 50 и на 100 Гэв

В таблице 1 приведены основные параметры больших кольцевых электронных ускорителей на 50 и на 100 Гэв. Предлагаемые варианты имеют некоторые особенности, отличающие их от обычных вариантов, например типа Nina Buster.

Предварительные расчеты показали, что при полном заполнении орбиты частицами средняя мощность В.Ч. системы оказывается слишком большой. Поэтому приняты варианты неполного заполнения орбит с увеличенной скважностью пучка, приближающейся в варианте на 100 Гэв к скважности линейных ускорителей. Так же, как и в линейных ускорителях, скважность можно уменьшить после замены секций на сверхпроводящие. Неполное заполнение орбит дает существенную экономию по средней мощности В. Ч. Длительность импульса тока на орбите выбрана из соображений разумного компромисса между величинами средней и импульсной мощности В. Ч.

Ускоритель рассчитан на ускорение электронов и позитронов, поэтому в свободных промежутках устанавливаются волноводные секции с постоянной геометрией по длине, на волне E_0 колебаний вида $2\pi/3$.

Схема размножения, которая описывается в следующем разделе, позволит получить проектные средние токи частиц обоих знаков. В пределах, допускаемых мощностью генераторов, можно будет варьировать величины и длительности импульсных токов e^+ и e^- без изменения средних величин.

Бустер рассчитывается на энергию $0,1 E_{\text{max}}$.

Мы отказались от сверхбольших прямолинейных промежутков так как вводы и выводы частиц могут быть осуществлены в запланированных обычных промежутках (расположенных в серединах Д-маг-

нитов, что, в частности, уменьшает допустимый радиальный размер диафрагмы ускоряющих волноводов). Эксперименты на встречных e^+ , e^- (и возможно e^+e^-) пучках гораздо удобнее проводить не в промежуточных, а в специальных байпассах.

На рис. 1 дана схема перевода пучков из ускорителя в бустер и обратно через конвертор, горн и линус.

Мы предполагаем спроектировать систему питания магнита, дающую плато в области максимума ($\sim 20\%$ от общего времени).

Приведенные в таблице 1 значения мощности В.Ч. и характеристики пучка относятся только к ускорительному режиму, но не к режиму встречных пучков.

2. Схема размножения

Схема размножения делает возможными эксперименты на встречных пучках электронов и позитронов (в байпассах с постоянным магнитным полем, соответствующем полю ускорителя в области плато), минуя большие затраты на получение высокого вакуума по всей длине ускорителя. Как указывалось, мы надеемся иметь плато $\sim 20\%$ всего времени в районе максимума энергии частиц. Таким образом, со скважностью не хуже $1/5$ можно будет ставить эксперименты на встречных пучках при точных максимальных значениях энергий e^+ и e^- , и с малыми скважностями — при прочих энергиях. Необходимое для этого время жизни частицы составляет всего лишь 5,5 мсек (при частоте повторения $f=100$ гц) вместо обычных нескольких часов. Это есть просто время ускорения частиц. По прошествии этого времени частицы разных знаков, имеющие максимальные энергии 50 или 100 Гэв, выводятся (по очереди) на конверторы (если электроны также включены в схему размножения). Конверторы К должны периодически освобождать дорожку для встречных частиц, или же частицы должны проходить мимо «чужого» конвертора.

На выходе конвертора соответствующей оптимальной толщины мы получаем очень большое число частиц малых энергий, идущих в относительно широком угле. Для уменьшения разброса по углам частицы пропускаются через горн с адиабатически спадающим продольным магнитным полем (от $H_0=150$ кгаусс до некоторого H_{min} , продолжающегося далее в линейный ускоритель). После этого частицы входят в линейный ускоритель, рассчитанный на энергию 400 Мэв. Эта энергия выбрана из расчета получения достаточного запаса по числу частиц, захватываемых в бустер, при энергии ускоренных (в основном кольце) частиц $E \gg E_{max}/2$. При энергии $E_{max}/2$ в бустер должны захватываться все частицы, имеющие после конвертора энергии и углы, лежащие внутри очерченной пунктиром площади рис. 2. В этом случае в фазовый объем $\Omega \sim 10^{-4}$ см² стерадиан, в интервал энергии $\Delta E/E \sim \pm 7\%$ и в интервал фаз $\Delta \varphi \sim \mp 0,3$, которые допустимы для бустера, попадает около 12 позитронов на каждый позитрон, падающий на конвертор.

При энергии ускоренных в основном кольце позитронов $E > E_{\max}/2$ число позитронов, захватываемых в бустер в указанный интервал $\Delta\varphi$, $\Delta E/E$ и фазовый объем Ω , приблизительно равно $N_E \sim 24E/E_{\max}$.

После ускорения в бустере до энергии 5 или 10 ГэВ фазовый объем и разброс по энергиям и фазам частиц, уменьшаются до величин, необходимых для ввода в ускоритель, теоретически без потерь (с учетом радиационного затухания в бустере). Магнитные поля бустера и ускорителя колеблются в противофазе (см. рис. 3).

Линейный ускоритель и ВЧ система бустера работают на длине волны $\lambda_0 = 0,75$ метра. От этого параметра сильно зависят фазовый и энергетический разбросы частиц, захватываемых из конвертора. Длина волны в основном ускорителе предварительно выбрана разной $\lambda_y = \lambda_B/2 = 37,5$ см.

На рис. 2 даны кривые числа снятых с конвертора электронов (или позитронов) $dN/d\varepsilon_0$ МэВ⁻¹ в интервале энергий 1 МэВ с углами, меньшими данного θ_0 в расчете на одну падающую частицу с энергией $E = 20$ ГэВ. Толщина конвертора 6 р.е. Частицы, имеющие энергию ε_0 (после конвертора) и угол θ_0 , лежащие выше пунктирной линии, не захватываются по условию фазового объема $\Omega \sim 10^{-4}$ см² стерад., а также по условиям $\Delta E/E \sim \pm 0,07$ $\Delta\varphi \sim \pm 0,3$. Захватываются частицы, лежащие внутри площади, ограниченной пунктирной кривой.

Число новых частиц в каждом цикле ускорения растет по экспоненте, пока не достигнет некоторого уровня, определяемого мощностью В.Ч. системы, потерями из-за излучения и др., после чего ускоритель работает в проектом режиме. Если прирост частиц вблизи проектных величин токов происходит не слишком быстро, то этот режим является устойчивым. В этом режиме большая часть частиц выводится в каждом цикле ускорения для использования в эксперименте, и некоторая часть выводится на конвертор для регенерации.

3. Программа физических экспериментов

Программа физических экспериментов на прямых e^- , e^+ и γ -пучках, а также на пучках вторичных частиц и на пучках монохроматических γ -квантов (здесь имеются дополнительные возможности получения мощных пучков монохроматических γ -квантов из-за больших токов позитронов) является обычной для электронного ускорителя. По причинам, указанным выше, с точки зрения скважности пучков предлагаемый ускоритель является чем-то средним между линейным ускорителем и обычным кольцевым, в котором орбита полностью заполняется частицами. После перехода на сверхпроводящие секции мы также сможем заполнять все кольцо ускорителя. По интенсивности пучков наш ускоритель эквивалентен линейному.

Программа встречных пучков в предлагаемом проекте оказывается расширенной по сравнению с обычной. Это хорошо видно из таблицы II. Предполагаемые светимости и сечения реакций, указанные в этой таблице, соответствуют максимальным (50 и 100 Гэв) энергиям встречных частиц; переданные импульсы соответствуют углу разлета $\pi/2$. Встречные $\gamma\gamma$ -реакции должны осуществляться в специальном байпасе, в котором предполагается расположить два безжелезных магнита с максимальным полем ~ 200 кГс в объемах порядка 1 см^3 ($0,3 \text{ см} \times 0,3 \text{ см} \times 10 \text{ см}$). Встречные фотоны синхротронного излучения, получающиеся в этих магнитах, очищаются далее от электронов и сталкиваются, имея площадь поперечного сечения, по-видимому, не хуже 10^{-2} см^2 . Интересно, что реакции на встречных $\gamma\gamma$ -пучках, до сих пор нигде не наблюдаемые, окажутся здесь наиболее интенсивными.

В кольце бустера мы рассчитываем расположить также ускоряющую систему для протонов (в ускорителе этого не требуется). После установки этого оборудования и линейного ускорителя-инжектора протонов в бустер на энергию 10 Мэв—мы будем иметь прямой ток протонов (с неполным заполнением кольца) на энергию ~ 100 Гэв, а также встречные ер пучки. Расчеты по этой программе еще не начаты. Нужно заметить, что хотя не имеет большого смысла проектировать протонный ускоритель так, чтобы на его дорожке ускорялись также и электроны, электронный ускоритель имеет смысл проектировать так, чтобы на его дорожке ускорялись также и протоны до тех энергий, которые допускаются магнитной системой электронного ускорителя. В отличие от первого варианта, в этом варианте дополнительные затраты на получение частиц другого типа относительно не велики.

Мы хотели бы здесь еще раз подчеркнуть, что предлагаемая система встречных пучков работает в режиме длительного накопления. После получения стационарного режима электроны и позитроны должны жить только в течение одного цикла ускорения, причем встречи осуществляются в течение $1/5$ этого времени. Это значит, например, что при частоте повторения $f=100$ гц в варианте на 100 Гэв каждый из бунчей испытывает по 14 столкновений в данном месте встречи. После этого бунчи выводятся на Конверторы для регенерации и обновляются. Таким образом, здесь резко ослаблены требования ко времени жизни встречных частиц в кольце. Это снимает многие проблемы и, в частности, позволит получить повышенную светимость.

На рис. 4 дано относительное расположение точек встреч (для двух встречных бунчей e^+ и e^-) и линейного ускорителя.

Авторы благодарят О. А. Вальднера, А. В. Шальнова, Р. Лазиева за ценные обсуждения.

Таблица 1

1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСКОРИТЕЛЯ

Максимальная энергия E_{\max}	(Гэв)	50	100
Длина орбиты L	(км)	7,46	21,01
Магнитное поле при максимальной энергии H_{\max}	(кгс)	1,8	1,2
Радиус кривизны магнитов R_M	(км)	0,93	2,78
Средний радиус $\langle R \rangle$	(км)	1,18	3,40
Общая длина магнитов L_M	(км)	5,85	17,47
Структура	—	$\frac{D}{2} \Phi \frac{D}{2} 0$	
Число периодов магнитной структуры M	—	140	208
Длина прямолинейного промежутка l_n	(м)	11,5	17
Общая длина прямолинейных промежутков L_n	(км)	1,61	3,54
Суммарная длина магнитов $D/2 \Phi D/2$	(м)	41,8	84
Длина периода магнитной системы l	(м)	53,3	101
Длина Φ -магнита l_Φ	(м)	20,45	41,22

2. Орбита

Число бетатронных колебаний на длине периода	—	0,224	0,224
Число бетатронных колебаний на длине орбиты M_ν	—	31,35	41,76
Коэффициент уплотнения орбит α	—	10^{-3}	$5,8 \times 10^{-4}$
Зазор между полюсами в D -магните на равновесной орбите, $2h$	(см)	4,5	4,5
Максимальная радиальная апертура в Φ -магните, $2C$	(см)	10	12
Показатель спада магнитного поля p	—	4×10^3	$9,09 \times 10^3$
Расстояние до асимптоты гиперболы a	(см)	23,3	30,6

3. Цикл ускорения

Частота повторения циклов ускорения f	(гц)	50 ÷ 400	50 ÷ 400
Номинальная частота f_{\min}	(гц)	50	50
Период обращения T	(мксек)	24,3	71
Максимальное время ускорения при $f = 50$ гц (включая медленный вывод)	(мсек)	11	11
Энергия инжекции $E_{\text{инж}}$	(Гэв)	10	20
Магнитное поле при инжекции $H_{\text{инж}}$	(гаусс)	360	240
Максимальное число обращений за цикл ускорения (при частоте $f = 50$ гц)	—	450	140
Максимальный прирост энергии за оборот U_{\max}	(Гэв)	0,17	0,99
Максимальная потеря энергии на излучение за один оборот $\Delta E_{\gamma \max}$	(Гэв)	0,6	3,15
Максимальное число синхротронных колебаний на одном обороте $\Omega/\omega_{\max} (\varphi_s = 45^\circ)$ при частоте повторения 50 гц	—	0,11	0,66
Среднеквадратичный разброс по фазам синхротронных колебаний из-за излучения в конце ускорения при демпфировании R -колебаний $\sqrt{\overline{A_\varphi^2}}$ (рад) при $f = 50$ гц	—	$\pm 0,27$	$\pm 0,1$
Среднеквадратичный разброс по амплитудам радиальных колебаний из-за излучения при демпфировании R -колебаний $\sqrt{\overline{A_\varphi^2}}$ при $f = 50$ гц	(см)	$\pm 1,0$	$\pm 0,9$

4. ВЧ — система ускорения

Частота f_y	(мгц)	800	800
Длина волны λ_y	(см)	37,5	37,5
Кратность ускорения q	—	$0,95 \times 10^4$	$0,75 \times 10^5$
Общая длина ускоряющих станций l_c	(км)	1,22	2,94
Число независимых станций в конце ускорения N_c	—	244	588
Длина независимой станции l_c	(м)	5	5
Число независимых станций в промежутке n_c	—	2	3
Коэффициент нагружения $a_{эф}/\lambda$	—	0,13	0,13
Групповая скорость $v_{гр}/c$	—	0,03	0,03
Максимальное напряжение, приходящееся на одну станцию ($\varphi_s = 45^\circ$)	(Мэв)	2,56	5,45
Импульсный ток частиц I имп.	(а)	0,02	0,04
Длительность импульса тока τ_n	(мксек)	10	2,5
Импульсная мощность питания одной станции $w_{имп}$ в конце ускорения	(мвт)	0,12	0,42
Полная импульсная мощность $W_{имп}$	(мвт)	28,5	310
Средняя мощность одной станции $\langle w \rangle$	(квт)	18,5	9,4
Полная средняя мощность питания ВЧ $\langle W \rangle$	(мвт)	4,5	5,5
Циркулирующий ток I цирк	(ма)	8,2	1,4
Средний ток I	(мка)	10	5
Средняя мощность ускоренного пучка W_n	(мвт)	0,5	0,5

Таблица 11

Некоторые типичные реакции на встречных пунктах для варианта ускорителя на 100 ГэВ

Тип встречных частиц	Энергии частиц (максимальные) (ГэВ)	Энергия легкой частицы в системе покоя тяжелой частицы (ГэВ)	Средняя светимость (см ⁻² сек ⁻¹) = $\frac{1}{5}$ (предварительная оценка)	Канал реакций	Предполагаемые сечения реакции σ (см ²) $\sim 10^{-31}$	Максимальный передаваемый импульс $V_{[q]}(\text{ГэВ/с})$	Ожидаемое число реакций $N_{\text{реакт./час}}$	Примечания
1) $\gamma \gamma$	$0,09 \times 0,09$		10^{32}	$\gamma \gamma \rightarrow \gamma \gamma$	$\sigma_{\text{макс}} = 3 \times 10^{-31}$ $\sigma_e = \epsilon_{\text{макс}} \sim 10^{-35}$	$\approx 0,09$	10^5 4	Синхротронное излучение в магнитном поле магнитов, расположенных в байпасе. Площади пучков $S = 10^{-3} \text{ см}^2$; Магнит $H_{\text{макс}} = 200$ кгаусс $I_M = 10$ см По одному встречному бунчу с каждой стороны. В каждом бунче размножено по 2×10^{13} электронов или позитронов (2×10^{13} γ -квантов)
2) $e \gamma$	$100 \times 0,09$	$0,36 \times 10^5$	10^{31}	$e \gamma \rightarrow e \gamma$	$0,7 \times 10^{-31}$	6	$0,3 \times 10^4$	$S = 10^{-3} \text{ см}^2$; 2×10^{12} электронов размножены в одном бунче. Позитроны также, 2×10^{13} γ -квантов на выходе из магнита длиной 10 см, $H = 200$ кГс.
3) $e e$	100×100		10^{31}	$-+ \rightarrow e^+ e^-$ $e e \rightarrow e^+ e^-$ $-+ \rightarrow \mu^+ \mu^-$ $e e \rightarrow \mu^+ \mu^-$	$10^{-36} - 10^{-35}$ $10^{-36} - 10^{-35}$ слабые взаимодействия	200	$0,04 - 0,4$ $0,04 - 0,4$	Число частиц на орбите $N_- = N_+ = 2 \times 10^{12}$ $S = 10^{-3} \text{ см}^2$
4) $e p$	50×50	$0,5 \times 10^4$	$2,5 \times 10^{30}$	$e - p \rightarrow e - p +$ остальные адроны	$\Sigma \sigma_{\text{адрон.}} \sim 0,5 \times 10^{-35}$		$\sim 0,04$	Упругий формфактор наблюдается не будет, неупругий формфактор, по предположению $\sim 0,3$. Предполагается также что, $N_p \sim 10^{13}$ и $N_- = 10^{13}$ $\sim 0,3$ распределены по 100 БУНЧАМ

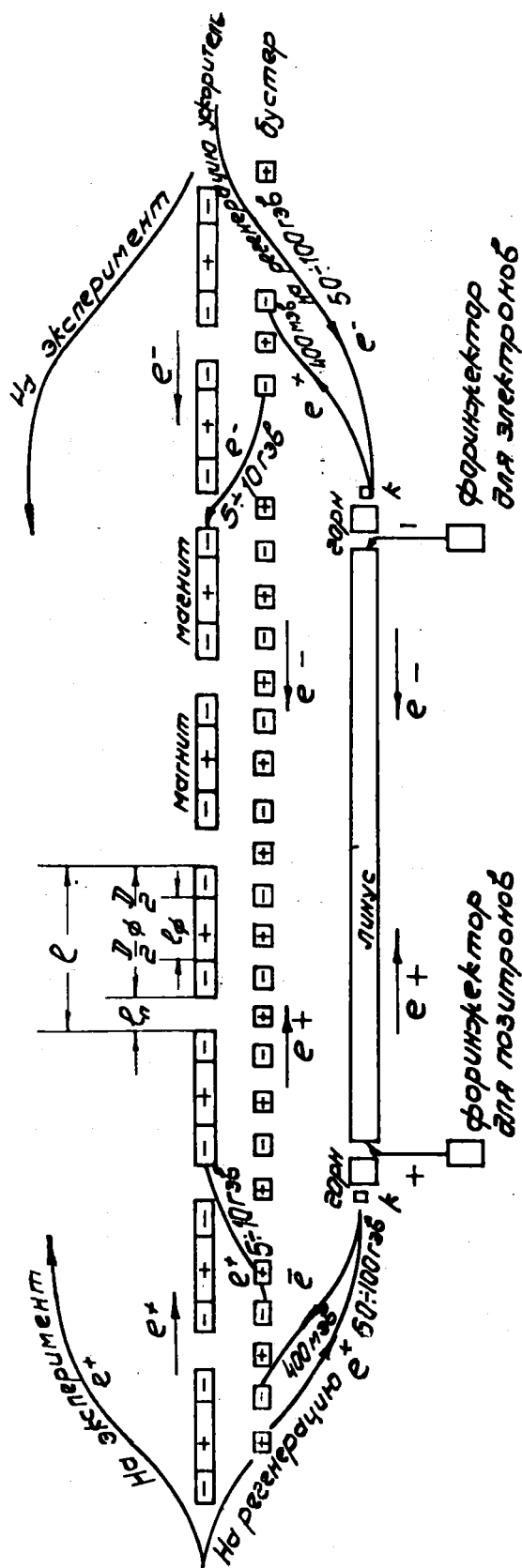


Рис. 1. Число частиц в кольце к циклу ускорения растет по экспоненте пока не достигает некоторой предельной величины. Форинжектор является триггером, запускающим схему размножения. Он включается после первого же запуска частиц. В режиме одновременного ускорения встречных пучков вначале запускается один пучок e^- и через время $T/2$ один пучок e^+ . Горн рассчитан на энергию частиц < 50 МэВ. Для частиц с энергией > 400 МэВ, ускоренных в линусе, он является лишь одной из линз.

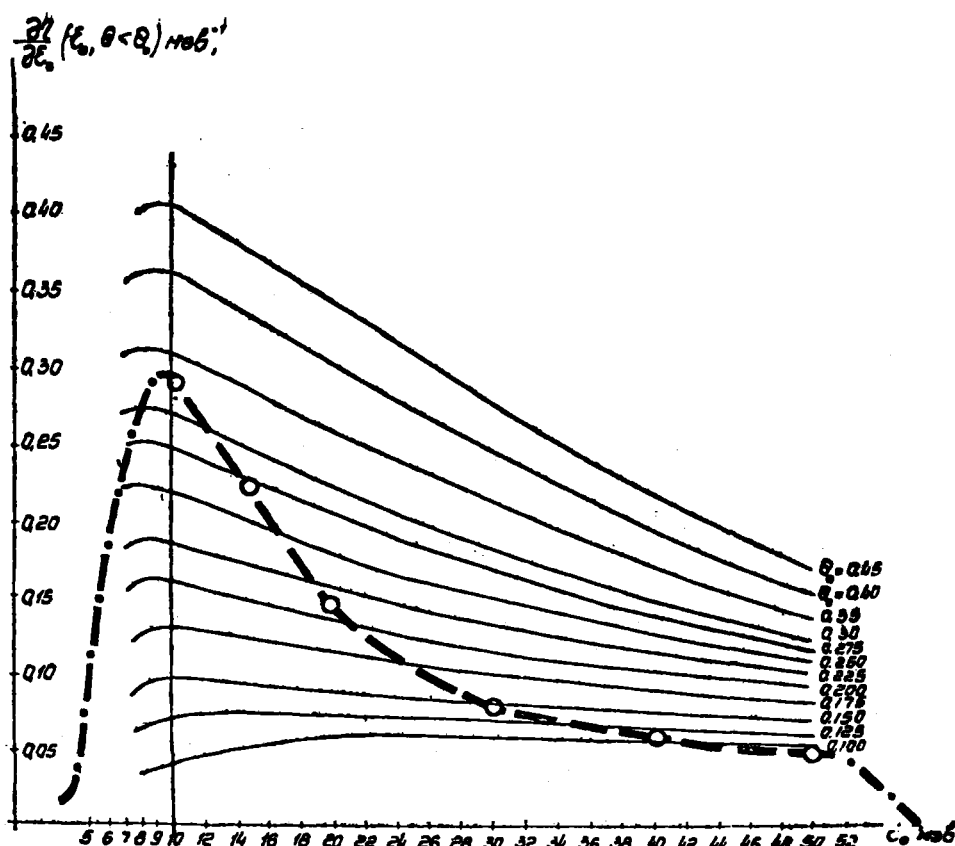


Рис. 2. Число электронов (или позитронов) в интервале энергий $\Delta\varepsilon_0 = 1$ Мэв с углами, меньшими θ_0 , в расчете на одну падающую частицу с энергией 20 Гэ. $t = 6$ рад. ед. Результаты численных расчетов на ЭВМ (для энергий меньших 10 Мэв расчетов нет).

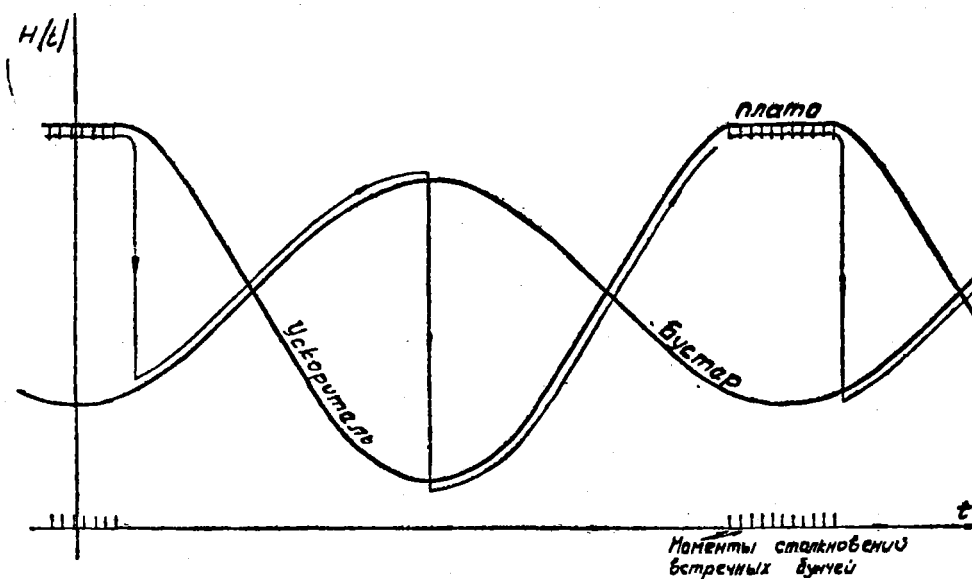


Рис. 3. Временная диаграмма работы бустерного и основного ускорителя.

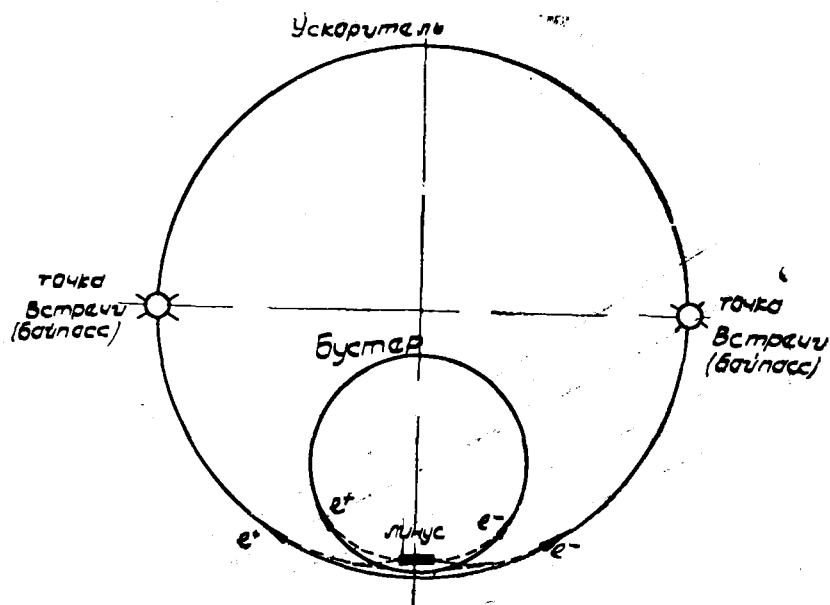


Рис. 4. Бунч электронов (позитронов) проходит через линус через время $T/2$ (T —период обращения) после прохождения бунча позитронов (электронов).

ДИСКУССИЯ

Reich: Did I understand correctly that triplets are used for focusing in the ring and if so, why?

Орлов: Магнит является обычным сильнофокусирующим магнитом с неразделенными функциями. Прямолинейные промежутки достаточно большой длины расположены в серединах дефокусирующих магнитов.

Воробьев: Рассматривался ли вариант применения замкнутой волноводной ускоряющей системы? Если да, то почему этот вариант не выбран?

Орлов: Этот вариант рассматривался. Мы отказались от него, так как стоимость вакуумной камеры-волновода, дополнительных вакуум-насосов и пр. намного превышает экономию в В.Ч. мощности.

