

ЭЛЕКТРОННО-ПОЗИТРОННЫЙ СИНХРОТРОН С РАЗМНОЖЕНИЕМ ЧАСТИЦ

А. И. АЛИХАНЯН, Ю. Ф. ОРЛОВ, А. И. БАРЫШЕВ, С. К. ЕСИН,
К. А. ИСПИРИЯН, И. П. КАРАБЕКОВ, Г. Г. МАНАСЯН, В. М. ХАРИТОНОВ,
С. А. ХЕИФЕЦ В. А. ХОЗЕ, В. П. НАДГОРНЫЙ, И. И. ФИНКЕЛЬШТЕИН.
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 принятые 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 $0,1 E_{max}$.

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

ников, что, в частности, уменьшает допустимый радиальный размер диафрагмы ускоряющих волноводов). Эксперименты на встречных ее, γ_1 , γ_2 (и возможно еще) пучках разумнее проводить не в промежутках, а в специальных байпасах.

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 байпасах 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 $E \geq E_{max}/2$. При энергии $E_{max}/2$ в бустер должны захватываться все частицы, имеющие после конвертора энергию и углы, лежащие внутри очерченной пунктиром площади рис. 2. В этом случае в фазовый объем $\Omega \sim 10^{-4}$ см² стерadian, 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 $\lambda_B = 0,75$ 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) $d\gamma/d\epsilon_0$ 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 проектном 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 оказывает-
ся расширенной по сравнению с обычной. Это хорошо видно из та-
блицы 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
байпассе, 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 излуче-
ния, 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 наблюдавшиеся, окажутся здесь наиболее интенсив-
ными.

В кольце бустера мы рассчитываем расположить также ускоряющую
систему для протонов (в ускорителе этого не требуется). После установ-
ки 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 встреч-
ные ер пучки. Рассчеты по этой программе еще не начаты. Нужно за-
метить, 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 допус-
каются магнитной системой электронного ускорителя. В отличие от пер-
вого варианта, в этом варианте дополнительные затраты на получение
частиц другого типа относительно не велики.

Мы хотели бы здесь еще раз подчеркнуть, что предлагаемая систе-
ма встречных пучков работает в режиме длительного накопления. Пос-
ле получения стационарного режима электроны и позитроны должны
жить только в течение одного цикла ускорения, причем встречи осу-
ществляются 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 ча-
стности, 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. Лазиев-
ва 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 Γ	(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 a	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 n	—	4×10^3	$9,09 \times 10^3$
Расстояние до асимптоты гиперболы a	(см)	23,3	30,6

3. Цикл ускорения

Частота поворота циклов ускорения f	(гц)	50÷400	50÷400
Номинальная частота f_{\min}	(гц)	50	50
Период обращения T	(миллек)	24,3	71
Максимальное время ускорения при $f = 50$ гц (включая медленный вывод)	(миллек)	11	11
Энергия инъекции Енж.	(Гэв)	10	20
Магнитное поле при инъекции $H_{\text{инж}}$	(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 ΔE_{\max}	(Гэв)	0,6	3,15
Максимальное число синхротронных колебаний на одном обороте $\Omega/\omega_{\max} (\Phi_s = 45^\circ)$ при частоте повторения 50 гц	—	0,11	0,66
Среднеквадратичный разброс по фазам синхротронных колебаний из-за излучения в конце ускорения при демпфировании R -ко	—		
лебаний $\sqrt{\bar{A}_\varphi^2}$ (рад) при $f = 50$ гц	—	±0,27	±0,1
Среднеквадратичный разброс по амплитудам радиальных колебаний из-за излучения при демпфировании R -колебаний $\sqrt{\bar{A}_\varphi^2}$ при $f = 50$ гц	(см)	±1,0	±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 $a_{\text{эфф}}/\lambda$	—	0,13	0,13
Групповая скорость v_{gr}/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 $W_{\text{имп}}$ в конце ускорения	(МВт)	0,12	0,42
Полная импульсная мощность $W_{\text{имп}}$	(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 II

Некоторые типичные реакции на встречных пунктах для варианта ускорителя на 100 ГэВ		Приимечания			
Качественные расчеты		Синхротронное излучение в магнитном поле магнитов, расположенных в байпассе.			
1) $\gamma\gamma$	$0,09 \times 0,09$	10^{12}	$77 + \gamma$	$\sigma_{\max} = 3 \times 10^{-31}$	10^5
				$\sigma_{\varepsilon} = \varepsilon_{\max} \sim 10^{-35}$	$N_{peak}/\text{рас} = 0,09$
					$Q_{peak}/\text{рас} = 4$
					$V_{[q_2]}(f_{ab/c})$
					$Q_{peak}/\text{рас} = 4$
					$N_{peak}/\text{рас} = 0,09$
					$D_{peak}/\text{рас} = 10^5$
					$I_M = 10 \text{ см}$
					По одному встречному бунчу с каждой стороны:
					В каждом бунче размножено по 2×10^{13} электронов или позитронов (2×10^{13} γ -квантов)
					$S = 10^{-2} \text{ см} ; 2 \times 10^{12}$ электронов размножены в одном бунче. Позитроны также. 2×10^{13} γ -квантов на выходе из магнита длиной 10 см, $H = 200$ кгс.
2) $e\gamma$	$100 \times 0,09$	$0,36 \times 10^5$	10^{31}	$e\gamma \rightarrow e\gamma$	$0,3 \times 10^4$
					$10^{-36} \pm 10^{-35}$
					$10^{-36} \div 10^{-35}$
					(слабые взаимодействия)
3) $e^- +$	100×100		10^{31}	$- + -e^+ e^- e^- e^+$	$200 \quad 0,04 \div 0,4$
					$- + -e^- e^- e^- e^+$
					$0,04 \div 0,4$
4) e^p	50×50	$0,5 \times 10^4$	$2,5 \times 10^{30}$	$e^- p \rightarrow e^- p +$ остальные адроны	$\Sigma \hat{\sigma}_{\text{нейтр.}} \sim 0,5 \times 10^{-35}$
					$\sim 0,04$
					Упругий формфактор наблюдался 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

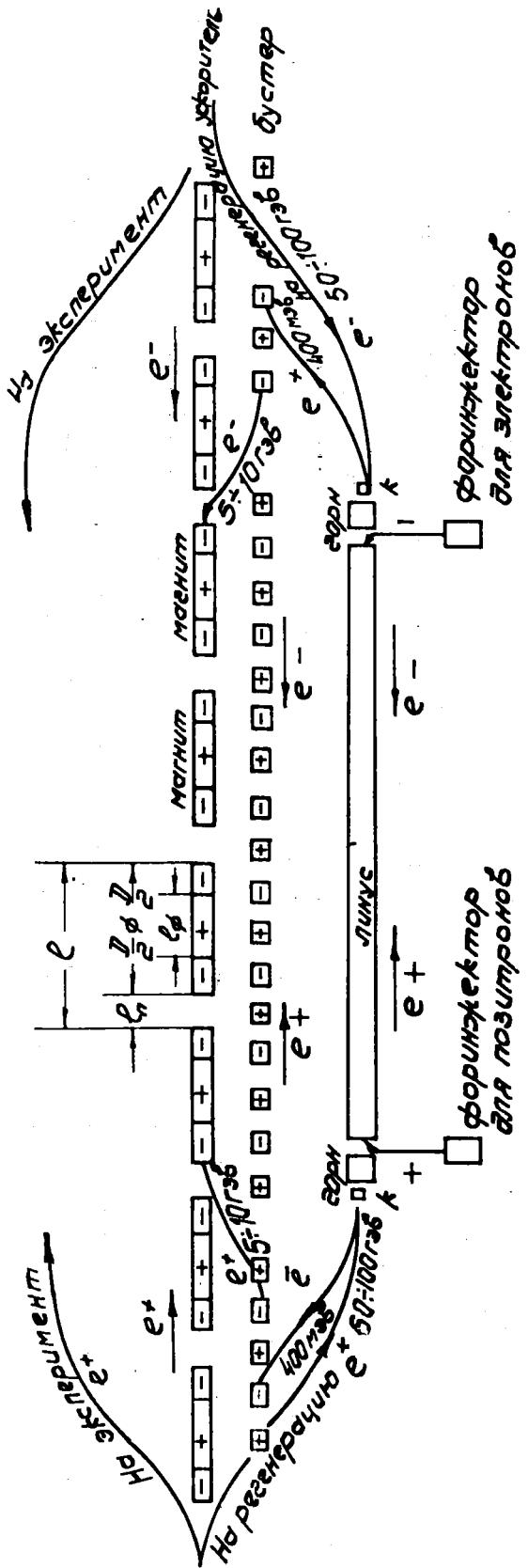


Рис. 1. Число частиц в кольце от цикла к циклу ускорения растет по экспоненте пока не достигает некоторой предельной величины. Форинжектор является триггером, запускающим схему размножения. Он выключается после первого же запуска частиц. В режиме одновременного ускорения встречных пучков вначале запускается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

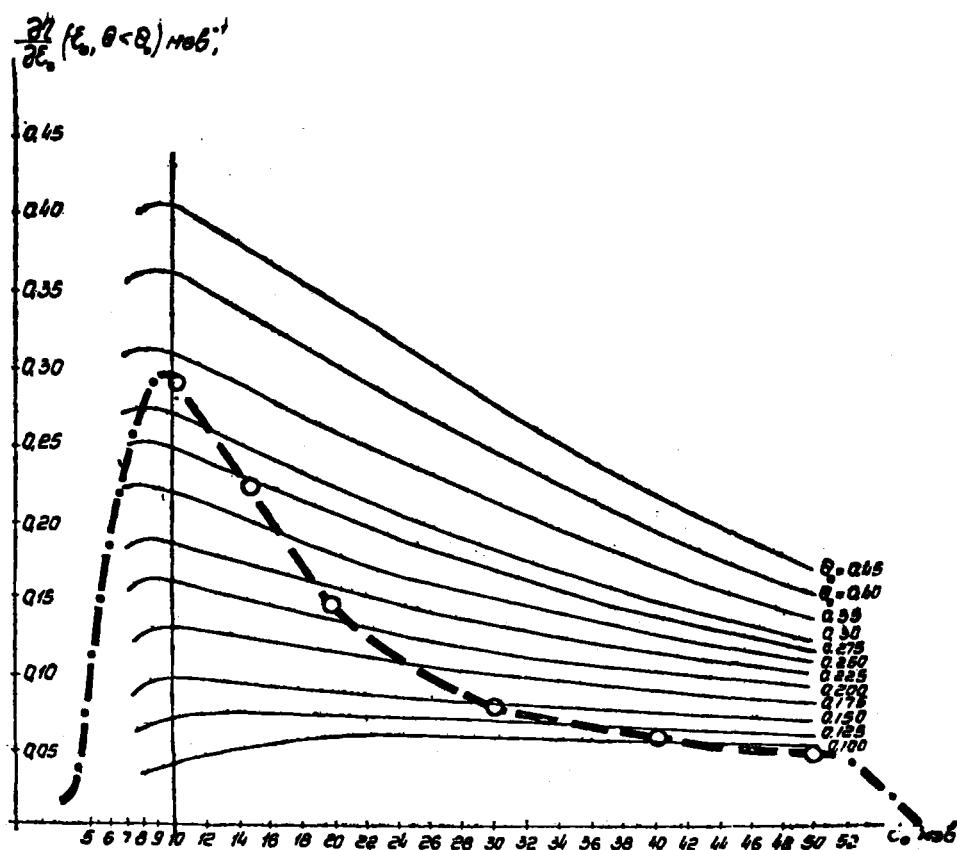


Рис. 2. Число электронов (или позитронов) в интервале энергий $\Delta\epsilon_0 = 1$ Мэв с углами, меньшими Θ_0 , в расчете на одну падающую частицу с энергией 20 ГэВ. $t=6$ рад. ед. Результаты численных расчетов на ЭВМ (для энергий меньше 10 Мэв расчетов нет).

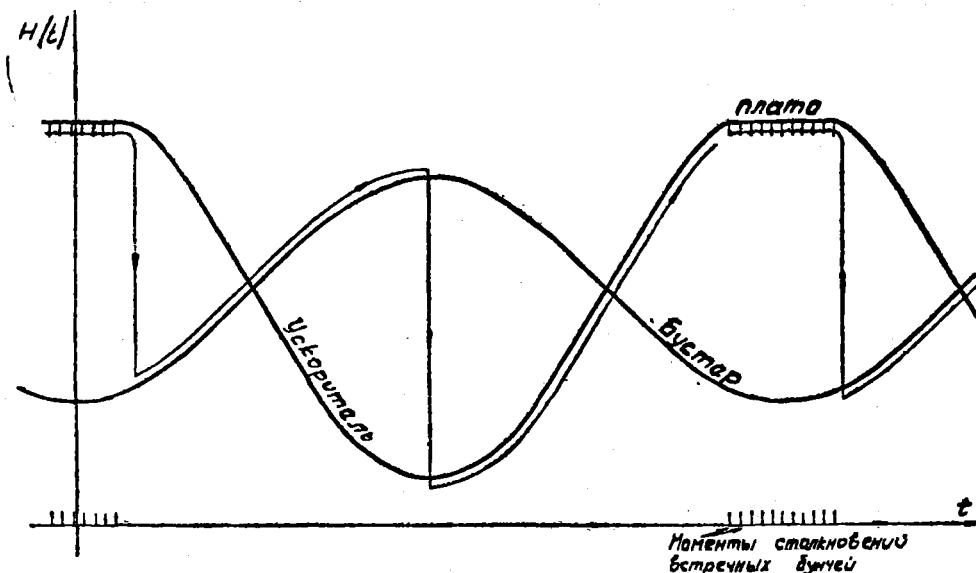


Рис. 3. Временная диаграмма работы бустерного и основного ускорителя.

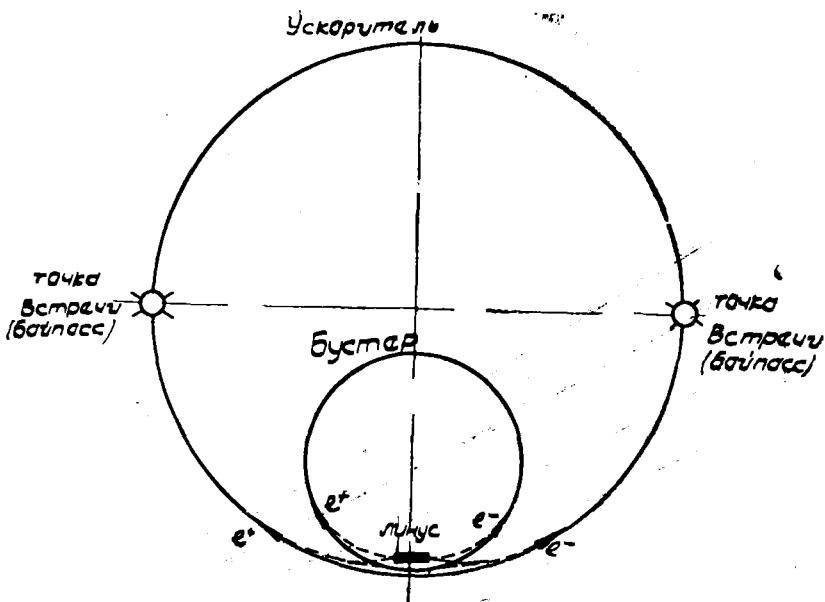


Рис. 4. Бунч электронов (позитронов) проходит через линус через время $T/2$ (T —период обращения) после прохождения бунча позитронов (электронов).

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 ускорющей 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.

