

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ УСКОРЕНИЯ*А. И. Алиханьян, С. А. Хейфец***1. ВВЕДЕНИЕ**

Настоящий обзор составлен в основном по материалам VII Международной конференции по ускорителям высоких энергий, проходившей 27 августа — 2 сентября 1969 г. в Ереване (Цахкадзоре). Однако мы сочли правильным расположить материал тематически, не придерживаясь строго того порядка, в котором он докладывался на самой конференции.

Обзор состоит из двух главных частей, первая из которых (гл. II) посвящена рассмотрению состояния дела и планам развития традиционных методов ускорения, а вторая (гл. III) — новым методам ускорения. Такое разбиение, конечно, весьма условно. Так, метод встречных пучков, отнесенный нами к традиционным методам, в действительности очень молод и едва насчитывает 13 лет с момента первых предложений. Однако нам кажется, что главным классифицирующим соображением в нашей области является следующее: используется или нет данный метод ускорения по своему основному назначению для постановки и проведения экспериментов в области физики элементарных частиц и высоких энергий. До тех пор, пока развитие метода идет внутренним образом по отношению к экспериментам с ускоренными пучками частиц, он может рассматриваться как новый. С этой точки зрения метод встречных пучков, давший уже целый ряд блестящих экспериментальных результатов, при всей его молодости можно отнести к испытанным и принятым на вооружение физиками-экспериментаторами методам ускорения. С другой стороны, развитие обычных ускорителей не остается в стороне от использования новых методов или их приложений. В особенности это справедливо в отношении криогенных и низкотемпературных методов, которые находят все больше применений в планах совершенствования действующих и проектах сооружения новых ускорителей. Все более широкое использование в ускорительной технике находят также вычислительные и управляющие машины. Тем не менее разбиение на традиционные и новые методы удобно и в достаточной степени оправдано существующей практикой работы в области ускорения.

Мы не будем касаться в нашем обзоре экспериментальных работ, проводимых на ускорителях, а также проблем физики высоких энергий и их влияния на перспективы отдаленного будущего ускорителей, ограничившись лишь задачей нарисовать картину современного состояния дела в ускорительной области. Однако наш обзор был бы несколько обеднен, если бы мы не упомянули очень интересный доклад Окуня¹, в котором был рассмотрен ряд экспериментальных проблем, разрешения которых

в опытах на ускорителях ждет физика высоких энергий. Так, первоочередной задачей на таких ускорителях, как Серпуховской, кроме исследований адронов и их взаимодействий, является обнаружение чисто лептонных процессов — рассеяния электронного нейтрино на электронах и рождения пар мюонов мюонным нейтрино в кулоновском поле ряда. Большой интерес также представляло бы обнаружение нейтрального слабого тока (например, в распаде нейтрального каона на два мюона).

Особенно интересными являются вопросы о зависимости сечений слабого взаимодействия лептонов от энергии и обнаружении области, в которой происходит «обрезание» роста сечений таких процессов. Указанием на то, что остановка роста должна иметь место, служит необъясненная до сих пор малость высших порядков слабого взаимодействия. Ясно, что фундаментальным для понимания слабых взаимодействий являются поиски эффектов, в которых проявляются высшие порядки, либо эксперименты во встречных пучках лептонов с энергией в сотни Гэв. В докладе¹, представляющем собой систематический обзор взаимодействий элементарных частиц, рассматриваются и другие столь же важные проблемы, ожидающие еще своего решения в опытах на ускорителях.

Для характеристики современного состояния ускорителей интерес представляет также сравнение больших электронных и протонных ускорителей с точки зрения выхода вторичных частиц, их чистоты, размеров и с точки зрения других экспериментальных возможностей, проведенное в докладе Риса¹³² и последовавшей затем дискуссии. Основным выводом этих обсуждений является то, что каждый из типов ускорителей имеет определенные преимущества перед другим; выход вторичных адронных пучков больше для протонных ускорителей, электронные ускорители имеют преимущества в чистоте нейтральных пучков и в плотности пучков вторичных лептонов. Однако и на тех, и на других ускорителях с успехом ведутся эксперименты, ранее традиционно относившиеся к области использования либо только протонных, либо только электронных ускорителей.

II. ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ

В настоящее время традиционные методы ускорения (внешними автофазирующими электрическими полями при комнатных температурах) являются единственными методами, лежащими в основе всех действующих и сооружаемых ускорителей на высокие энергии. Потребности экспериментальной физики во все более высоких энергиях еще удовлетворяются прямым путем — сооружением все более грандиозных (по размерам и мощности) ускорителей; технические и экономические трудности создания таких ускорителей преодолеваются тем или иным образом.

1. Состояние и модернизация действующих ускорителей

а) Синхротроны. В табл. I и II приведены сводные данные о всех действующих, сооружаемых и проектируемых протонных и электронных синхротронах на энергию выше 1 Гэв.

На Серпуховском протонном синхротроне создан целый комплекс каналов вторичных частиц, генерируемых на внутренних мишенях²². На рис. 1 приведена схема размещения каналов в экспериментальном зале с размерами 156×90 м². Каналы спроектированы так, что формируемые пучки могут отклоняться на несколько экспериментальных установок.

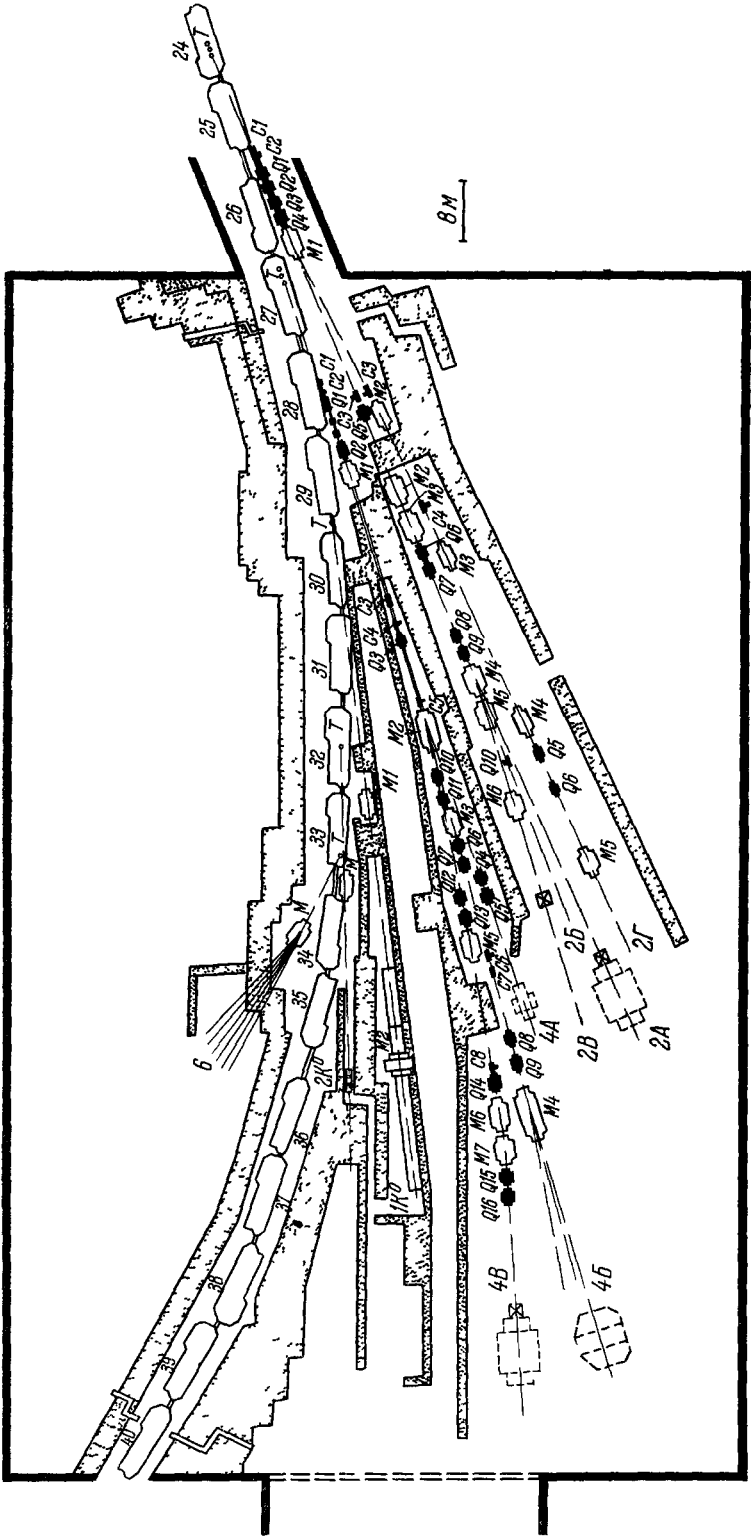


Рис 1 Схема размещения вторичных пучков синхротрона ИФВЭ (Серпухов) ²².

Протонные

Местонахождение	Состояние (сооружен/проект)	Пучок			Инжектор		Маг			
		энергия, $\Gamma_{эв}$	шп/сек	10^{12} р/сек	энергия, $M_{эв}$	ток, μa	поле			максимальная мощность, $M_{ет}$
							показатель	инжекций, $ас$	в максимуме, $кгс$	
ЦЕРН										
1. Женева	1959 г.	28	1/2	0,75	50	135	288	147	14	41
2. Женева	Проект	(300)	1/3	(10)	8000		4780	355	12	180
Франция										
3. Сакле	1958 г.	3	1/3	0,1	3,6	5	0,6	326	14,9	24
4. Сакле	Проект	45	2/1	1	100	88	0	174	18	9,4 (средн.)
ФРГ										
5. Карлсруэ	»	(60)	1/2	5	2000	—	—	82	18	36
СССР										
6. Дубна	1957 г.	10	1/10	0,015	9	1	0,66	150	12,6	140
7. Москва	1967 г.	1	1/2	0,005	1	5	190	250	10	—
8. Москва	1961 г.	7	1/6	0,01	4	10		90	9,5	25
9. Москва	Проект	(1000)	1/3	(10)	18 000	—		—	—	—
10. Серпухов	1967 г.	76	1/8	0,18	100	100	440	76	13	100
Англия										
11. Бирмингем	1953 г.	1	1/4	0,0025	0,46	1	0,68	210	12,5	7
12. Резерфорд	1963 г.	7	1/4	2,0	14,9	45	0,6	229	14	160
США										
13. Аргон	1963 г.	12,7	1/2	1—1/2	50	30	0	482	21,5	110
14. Брукхейвен	1960 г.	33	1/2,5	3	51	60	357	121	13	30
15. Брукхейвен	Проект	(1000)	1/1	(10)	25 000	0,002		1500	60	—
16. Беркли	1954 г.	6,2	1/5	1,5	19	25	0,67	417	15,5	121
17. Беркли	Проект	(1,4)	60/1	(13)	3	10	28	346	10	1
18. ЛНУ, Батавия	—	Сооружается (200—500)	1/4	(15)	8000	0,010		495	9—22,5	13
19. Принстон	1963 г.	3	19/1	1	3	4	0,6	278	13,8	2,5

Таблица I

синхротроны

нит		кольцо		вес		ВЧ система				Экспериментальные возможности	
диаметр, м		апертура		кг Fe	т Cu	кратность	диапазон ВЧ, Мгц	прирост энергии	максимальная мощность, кет	полная площадь, 1000 Мэ	полная мощность, Метт
		h, см	W, см								
200		7	14,6	3	130	20	2,9—9,55	79 (макс.)	375	11	33
2400		6	10	29	2100	4620	182,5—183,6	7500	6000	—	—
22		10,5	36	1,08	55	2	0,76—8,44	1,16	4	4,2	18
300		12,2	6,8	3,4	240	96	13—31	240	—	—	—
360		4,8	85	—	—	120	30,2—31,9	365	347	—	—
72		35	120	36	2700	1	0,2—1,45	2,4	500	2,7	26
17		1,6	2,1	0,016	2	5	1,25—25	2 (макс.)	—	—	—
80		8	11	2,7	—	7	0,65—8,3	4,4	500	—	—
5400		4	6,6	20	—	—	—	56 000	20,000	—	—
472		17	11,5	20	700	30	2,6—6,1	180	300	—	—
10		10	33	0,8	9	1	0,22—9,26	0,2	10	0,28	0,8
53		100	20	7	250	4	1,4—7,98	5,5	45	7,3	24
55		13,3	81,3	4,7	68	8	4,4—14	10	60	12,6	40
257		6,4	13,3	4	400	2	1,4—4,46	100	300	15	36
1500		5	12,5	—	—	—	—	30 000	—	—	—
19,3		25	112	9,7	347	1	0,3—2,3	1,5	100	7	21
32		4	10	0,8	8,2	8—100	1,6—32	—	800	—	—
2,000		5	12,5	9,8	860	1000	52	3460	2000	—	—
25		6	18,9	0,4	15	8	30	61	320	3,5	20

Электронные

Местонахождение	Состояние (сооружен/ проект)	Пучок			Инжектор		поле			Маг
		энергия, Гэв	мм/сек	10 ¹² е/сек	энергия, Мэв	ток, ма	показатель	инжекция, эс	в максимуме, кэс	мощность средняя, Мвт
ФРГ										
1. Бонн	1967 г.	2,3	50	2	25	250	23	100	10	0,55
2. Гамбург	1964 г.	7,5	50	5,6	40	180	70	42	7,9	1,7
Италия										
3. Фраскати	1959 г.	1,1	20	0,4—1	12,4	30	0,61	110	10,2	0,15
Япония										
4. Токио	1961 г.	1,3	22,5	0,8	9	100	14,8	80	11	0,402
Швеция										
5. Лунд	1960 г.	1,2	12,5	0,045	6,45	40	10,6	59	11	0,185
СССР										
6. Ереван	1967 г.	6,1	47,4	3,5	50	170	115	66	7,95	1,9
7. Ереван	Проект	100—50	50—400	200	—	—	4·10 ³	360	1,8—1,2	—
8. Томск	1964 г.	1,3	2	0,04	5,5	50	0,58	43	12	0,8
9. Москва	Сооружается	1,2								
Англия										
10. Дарсбери	1966 г.	5	53	6	40	500	47	64	8	0,95
11. Дарсбери	Проект	15—20			3000		516	83,4	0,556	
США										
12. Кембридж	1962 г.	6,28	60	9	130	100	91	150	7,6	
13. Калтех	1952 г.	1,53	1,5	0,05	10	500	0,6	90	13,3	0,28
14. Корнелл	1964 г.	2,1	30	0,9	10	50	26	55	10	0,25
15. Корнелл	1967 г.	10	60	1,2	150	100	432	50	3,3	0,77

Таблица II

синхротроны

нит							ВЧ система				Экспериментальные возможности	
кольцо			вес									
диаметр, м	апертура		Cu, тн	Fe, тн	крат- ность	частота, Мгц	приrost энергии, кэв/об	макси- мальная мощность, квт	полная площадь, 1000 м2	полная мощ- ность, Мвт		
	h, см	W, см										
22,2	4	9	17,4	133	116	500	330	80	1	2		
50,4	7	12	77	570	528	500	1250	360	6,4	23		
8,74	5,7	19,2	10	100	4	43	4,5	16,5	0,4	2,5		
10,9	3,5	11	7,9	53	16	138	10	20	0,45	0,45		
10,8	3,6	6,5	11,2	24	45	399	60	4	0,3	0,8		
69	3	9,8	27	400	96	133	720	520	1,8	8,0		
2360— 6800	—	10—12	—	—	$0,95 \cdot 10^4$ — $0,75 \cdot 10^5$	800	$0,77 \cdot 10^6$ — $4,15 \cdot 10^6$	$28,5 \cdot 10^3$ — $310 \cdot 10^3$	—	—		
10,7	8,4	23	3	120	4	36,5	1,5	120	0,6	1,1		
70,2	6,7	11,5	40	360	300	408	470	480	3,2	12		
421	1,8	5			3600	816		1120 (15 Гэв/ма)				
75	3	16	36,6	3006	360	476	6000	400	2	5,5		
9,6	6	18	18	155	4	40	0,7	300		0,25		
32	2,8	6,4	2,7	60	75	433	35	20	5,4	1,7		
250	2,5	5,5	26	200	1800	714	10^4	425	1,1	2		

Рабочий диапазон импульсов в канале 2 составляет 40—60 Гэв/с, а в канале 4 25—40 Гэв/с. Каналы $1K^0$ и $2K^0$ предназначены для экспериментов с каонами и нейтронами. Наконец, имеется канал 6 положительных частиц с импульсами в пределах 0,8—20 Гэв/с.

Для работы на внешних мишенях на ускорителе разработаны проекты быстрого²³ и медленного вывода протонов²⁴. В последнем проекте предусматривается вывод в течение плоской части цикла, длительность которого может доходить до 1,5 сек. Расчетная эффективность вывода составляет 90%. Такая эффективность медленного вывода была экспериментально подтверждена на протонном синхротроне (PS) ЦЕРН. Измеренная величина $90,7 \pm 3,1\%$ ²⁵ находится в хорошем согласии с теоретическими расчетами. Эффективность быстрого вывода на этом синхротроне равна 100%. Система трехоборотного вывода протонов с эффективностью, близкой к 100%, рассчитана для Брукхейвенского сильнофокусирующего синхротрона (AGS)²⁶.

На Ереванском синхротроне получены два γ -пучка с растяжкой до 2 мсек, а в начале 1970 г. выведен электронный пучок с растяжкой 2,5 мсек.

На Корнелльском ускорителе в настоящее время используются 4 фотонных пучка и имеется доступ к внутреннему пучку в длинном прямолинейном промежутке³². В дальнейшем планируется получить внешний электронный пучок.

Более подробные сведения о состоянии действующих синхротронов можно найти в работах^{2, 4, 8-14, 20}. Работа²¹ представляет собой каталог ускорителей, выпущенный к конференции.

Постановка все более тонких экспериментов для исследования процессов со все меньшими сечениями, внедрение быстродействующих средств регистрации, а также увеличение возможностей обработки экспериментального материала, связанное с повсеместным использованием средств автоматизации и вычислительной техники, предъявляют к действующим синхротронам все новые требования в отношении повышения эффективности использования этих машин. В большинстве лабораторий в этой связи ведется или планируется модернизация и усовершенствование ускорителей, целью которых является увеличение средней и мгновенной интенсивности, надежности, увеличение экспериментальных площадей и мощностей экспериментальных магнитов, увеличение числа выведенных пучков, их растяжки, эффективности вывода и чистоты вторичных пучков.

Увеличение интенсивности пучка синхротрона (так же как и других типов ускорителей) ограничено теоретически эффектами пространственного заряда и взаимодействия пучка с ускоряющей системой. Однако сложность и неопределенность расчетов этих эффектов не дает возможности утверждать, что в какой-либо из действующих машин наблюдается ограничение тока, обусловленное эффектами, хотя предел не должен быть существенно выше уже достигнутых в синхротронах интенсивностей. Кроме того, а priori ясно, что предел может быть отодвинут увеличением энергии инжектируемых частиц и увеличением мощности ускоряющей системы.

Брукхейвенский AGS был остановлен в июне 1969 г. В течение пяти месяцев будет перестроен туннель с целью соединения его с новым будущим инжектором и с добавочными уже сооруженными экспериментальными площадями, увеличены защита и мощности питания магнитов и ускоряющего поля. Это позволит увеличить частоту повторения циклов до 1 гц (без плоской части цикла) либо увеличить растяжку медленного вывода до 1 сек. В 1971 г. будет введен в действие новый линейный уско-

ритель на энергию 200 Мэв, что приведет к увеличению интенсивности пучка AGS в 5 раз ²⁷.

Для модернизации PS ЦЕРН был выбран другой путь — сооружение специального бустерного ускорителя ²⁸. Это обусловлено не только стремлением увеличить интенсивность ускорителя, но также желанием уменьшить адмитанс пучка CPS, который будет использован как инжектор для пересекающихся накопительных колец (ISR, см. ниже). Начавшееся уже сооружение бустера, который представляет собой сильно-фокусирующий четырехдорожечный синхротрон с разделенными функциями на энергию 800 Мэв, будет закончено в 1972 г.

В табл. III ²⁷ приведены основные параметры бустера. Во время прошлогодней остановки CPS был перестроен туннель, усилена защита и увеличена мощность питания магнита. Это обеспечивает создание плоской части кривой магнитного поля длительностью 0,4 сек при частоте повторения 0,5 гц. Для увеличения интенсивности пучка до 10^{13} р/имп требуется также перестройка системы высокочастотного питания. Эта перестройка также будет завершена к 1972 г. Наконец, сооружен новый экспериментальный зал площадью 10^4 м², который в настоящее время используется для сборки элементов ISR.

Таблица III
Основные параметры бустера CPS

Энергия	800 Мэв
Энергия инжектора	50 Мэв
Критическая энергия	4,5 Мр
Интенсивность	10^{13} протонов/имп
Число дорожек	4
Средний радиус	25 м
Радиус кривизны	8,3 м
Структура	DO ₂ FBO ₄ BFO ₂ D
Сечение зазора магнита	7×14 см ²
Напряжение на обходе (макс.)	12 кв
Диапазоны высокой частоты	3—8 Мгц
Число ускоряющих промежутков на 1 дорожку	1
Средний прирост энергии за оборот . . .	1 квэв
Давление в камере	10^{-8} тор
Минимальное время цикла	1,2 сек

Планы модернизации Принстон-пенсильванского ускорителя (PRA) ²⁹ также включают сооружение высокоинтенсивного бустера на энергию 75 Мэв. Он позволит поднять интенсивность до $2 \cdot 10^{13}$ р/сек. Ту же цель преследуют планируемые использование несинусоидального ускоряющего напряжения, повышение энергии инжектора (Ван-де-Граафа) с 3 до 4 Мэв, усовершенствование системы коррекции при инжекции. В конце 1969 г. вошла в строй уникальная система формирования плоской вершины поля длительностью 50 мсек с постоянством $\pm 0,001\%$ при частоте повторения 10 гц, построенная на твердых вентилях.

Усовершенствования синхротрона «Сатурн» (Сакле) включают переход от инжектора Ван-де-Граафа с энергией 4 Мэв к линейному ускорителю на энергию 20 Мэв (получен пучок с интенсивностью 15 ма с эмитансом $2 \cdot 10^4$ рад·см в энергетическом интервале ± 150 квэв), ускорение дейтонов до энергии 2,3 Гэв (пучок содержит $2 \cdot 10^{11}$ частиц) создание источника поляризованных протонов (или дейтонов) и ускорение их ⁴.

Новая вакуумная камера и полюсные обмотки, которыми вскоре будет оснащен Аргонский ускоритель с нулевым градиентом (ZGS), должны привести к удвоению интенсивности этого синхротрона ²⁷.

На электронном синхротроне в Кембридже сооружен и используется линейный ускоритель на энергию 130 Мэв ²⁹.

Планы сооружений новых инжекторов имеют почти все крупные электронные синхротроны (кроме Корнелльского), а в Кембридже и Гамбурге такие инжекторы на энергии 250 и 400 Мэв уже сооружаются ^{30,31}. Это позволит не только увеличить интенсивность синхротронов, но и получать пучки ускоренных позитронов, а также накапливать их для экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках (в Кембридже с помощью обходного пути, в Гамбурге в сооруженном двойном накопительном кольце). Ереванский синхротрон, кроме того, будет оснащен новой керамической камерой и вторым экспериментальным залом с выводимыми туда дополнительными электронными и γ -пучками.

б) **Л и н е й н ы е у с к о р и т е л и.** В табл. IV содержатся сводные данные по электронным и протонным линейным ускорителям на большую энергию или интенсивность, включая также некоторые инжекторы синхротронов.

Наиболее эффективно (и эффектно) работает ускоритель SLAC. В 1968 г. в течение 5700 часов полного времени работы ускорителя экспериментаторы получили 13 000 часов. При этом 80% полного времени были отданы физике элементарных частиц, 12% — ядерной физике и только 8% — физике ускорителя ³².

Кроме весьма интенсивного основного электронного пучка с числом частиц $1,8 \cdot 10^{14}$ электронов/сек, ускоритель дает также ускоренные пучки позитронов, мюонов, пионов и каонов, а также γ -кванты.

Взрывная нестабильность, обнаруженная на Стэнфордском ускорителе в 1966 г., при запуске теперь подавляется (до величины тока 50 ма при длительности импульса $1,6 \text{ мксек}$ в конце ускорения) применением сильной фокусировки и селективной микроволновой перестройки некоторых секций ускорителя ⁷⁴.

Все действующие в настоящее время линейные ускорители обладают существенным недостатком с точки зрения возможностей их использования для физических экспериментов: малой длительностью импульса ускоренных частиц, что приводит к большим нагрузкам электронной детектирующей аппаратуры. Преодолеть этот недостаток можно, снабжая ускоритель накопительным кольцом для растяжки пучка. Такие работы ведутся в Сакле ³⁴, где предложено устройство ALIS, и в Стэнфорде, где проектируемое накопительное кольцо может быть использовано также и для этой цели ³⁵.

Возможен и прямой путь — сооружение линейных ускорителей с малой скважностью. Такие линейные ускорители сооружены в США ³⁶ и Франции ³⁷. Эти ускорители дают пучки с энергией $400\text{—}450 \text{ Мэв}$ при скважности около 2%.

Можно думать, что кардинальное решение вопроса будет получено путем создания сверхпроводящих линейных ускорителей непрерывного действия. Первый такой ускоритель на энергию 2 Гэв сооружен в лаборатории высоких энергий в Стэнфорде ³⁸. Успех, достигнутый на этом ускорителе, привел к возникновению планов перевода ускорителя SLAC на сверхпроводящие секции, что позволило бы достичь на нем энергии 100 Гэв ³⁰. Стоимость такой перестройки оценена в $60\text{—}70$ млн. долларов (для сравнения укажем, что удлинение SLAC лишь вдвое потребовало бы 175 млн. долларов) ³³.

Заметим, наконец, что линейные ускорители (как обычные, так и сверхпроводящие) являются составной частью проектов большого числа ускорителей ^{6,40,41-44}, где они используются в качестве ускоряющих станций вместо резонаторов.

Таблица IV

Линейные ускорители

Местонахождение	Состояние (пущен/ соору- жается)	Пучок					Ускоряющая система							
		энер- гия, Гэв	интенсив- ность 10 ¹² ча- стиц/сек	длитель- ность импульса, мксек	импл./сек	эмитанс, рад·мм	диа- метр пуч- ка, см	число сеч- ний	отноше- ние групп- овых скоростей	время запол- нения, мксек	частота, Мгц	число клин- стро- нов	полная мощ- ность ВЧ, Мвт	приrost энергии, Мэв/м
Франция														
1. Орсе (e)	1959 г.	2,3	40—120	1,5	50—150	0,5	0,8	1+37	0,05— 0,01	0,7—0,9	2999	38	840	10
2. Сакле (e)	1968 г.	0,64	600 ма	10	1000— 2000	0,4	0,5	30	0,05— 0,01	1	2998	15	12	3,3
СССР														
3. Харьков (e)	1964 г.	1,8	5	1,4	50	0,4	0,3	49	0,04	0,4	2797	49	850	9 (макс.)
4. Москва (e)	Соору- жается	0,06	(5000)	5,5— 0,01	50—900	—	1	6	0,022	0,3	1818	6	120	7
США														
5. МТИ (e)	Соору- жается (1971 г.)	0,4	940	9,0	2000	0,02	0,5	24	0,01— 0,024	1,2	2856	10	40	2,5
6. Стэнфорд (e)	1952 г.	1,2	1000	0,006— 0,275	0,1—23		0,6	31	0,006— 0,02	0,83	2856	31	600	12
7. Стэнфорд (e)	1966 г.	21,5	180	1,67	360	0,1	0,4	960	0,02	0,83	2856	245	4000	7
8. Стэнфорд (e)	Соору- жается	2				0,1	0,1	24	0,02		1300	24	0,36	14
9. Лос-Аламос (p)	Соору- жается (1972 г.)	0,8	6000	500	120	10	3	4		100	201	4	9	1—1,9
Инженкторы														
CPS (p)	1959 г.	0,05	100 ма	200		23		3		150	202,5		8,4	1,71
AGS (p)	1960 г.	0,05	60 ма	100		10		1		200	201,5		4,5	1,8
NAL (p)	Соору- жается	0,2	75 ма	100	15	10		9		200	201,3		37	1,4

в) Фазотроны и циклотроны. Последним крупным событием в этой области являлся запуск крупнейшего в мире синхротрона ФТИ АН СССР (Гатчина) на энергию протонов 1 Гэв ⁴⁵. В табл. V

Таблица V

Фазотроны

	ФТИ АН СССР ⁴⁵	ОИЯИ ²¹	ЦЕРН ²¹
Пучок запущен в	1968 г.	1953 г.	1957 г.
Энергия, Мэв	1000	680	598
Интенсивность внутреннего пучка:			
частиц/сек	$2 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{13}$	$8 \cdot 10^{12}$
ток, мкА	0,5	2,3	1,3
Частота повторения циклов, Гц	50—100	110	54,1
Магнит:			
диаметр полюса, см	685	600	500
магнитный зазор, см	50	60	45
выводной радиус, м	316,5	277	226
вес магнита, т	7500	7000	2500
мощность питания магнита, кВт . . .	1200	1000	800
Ускоряющая система:			
число резонаторов	1	1	1
апертура	—	12	12
интервал высокой частоты, мГц . . .	13,18—28,88	13,8—26,3	16,6—30,6
прирост энергии, кэВ/об	—	10	2,7—10
мощность ВЧ, кВт	400 (макс.)	50 (макс.)	20 (средн.)

приведены основные параметры этой машины. На конференцию было представлено несколько докладов, описывающих характеристики конструкции и работы как самого ускорителя, так и его отдельных узлов ^{46–48}.

Таблица VI

Релятивистские циклотроны

	Цюрих ⁵⁰	Ванкувер ⁵¹	Ок-Ридж ⁵⁸
Состояние	Сооружается (1973 г.)	Сооружается (1972 г.)	Проект
Пучок:			
энергия, Мэв	585 (р)	200—500 (р)	300 (р)
интенсивность внутреннего пучка, ма	100	100	—
частиц/сек	$6 \cdot 10^{14}$	—	—
Магнит:			
диаметр полюса, см	930	813	1070
магнитный зазор, см	50	50	7,5
выводной радиус, см	445	375	318
число секторов	8	6	4
Вес магнита, т	8×245	3200	1900
Вес обмотки, т	$8 \times 3,5$ (Cu)	3 (Al)	—
Мощность питания магнита, кВт . . .	560	2500	850
Ускоряющая система:			
число резонаторов	4	2	4
апертура, см	5	10	5
высокая частота, МГц	50	23,58	29,34
прирост энергии, кэВ/об	1400	400	1000
мощность ВЧ, кВт	600	1200	1600

В табл. V приведены также основные параметры действующих синхроциклотронов.

Введение в магнитное поле циклотрона периодических вариаций вдохнуло новую жизнь в этот способ ускорения. Развитие циклотронного метода ускорения, как можно видеть из докладов на конференции, идет по двум направлениям ⁴⁸.

1) Релятивистский циклотрон с жесткой фокусировкой на энергию протонов до 1 Гэв с интенсивностью до 100 ма. Два ускорителя этого класса — в Цюрихе ⁵⁰ и в Канаде ⁵¹ — приняты к реализации. В Дубне действует электронная модель релятивистского циклотрона с жесткой фокусировкой ⁵².

2) Изохронный циклотрон на энергию протонов порядка 100 Мэв, но с очень высокой моноэнергетичностью ускоряемого пучка ($\sim 10^{-4}$). Разработано несколько предложений таких ускорителей ⁵³⁻⁵⁶. Некоторые вопросы циклотронного способа ускорения рассмотрены в работе ⁵⁷. В работе ⁵⁸ изложены основы проекта четырехсекторного циклотрона на энергию 300 Мэв для ускорения тяжелых ионов.

В табл. VI и VII приведены соответственно основные параметры сооружаемых и проектируемых релятивистских циклотронов и параметры моноэнергетического циклотрона ОИЯИ ⁴⁹, которые дают представление о таких машинах.

Таблица VII
Параметры моноэнергетического циклотрона (МЦ)

Ускоряемые частицы:	
максимальная энергия, Мэв	80; 60; 120; 120; 180
диапазон изменения энергии выведенного пучка	0,25—1,0
энергетический разброс	$1 \cdot 10^{-4}$
интенсивность выведенного пучка (протоны), ма	100
Средняя напряженность на конечном радиусе, э	3292; 3985; 3960; 3460; 3967
Напряженность поля в центре, э	3037; 3861; 3837; 3317; 3844
Средний радиус конечной орбиты, см	400
Средний радиус орбиты при инжекции, см	54
Энергия инжектируемых ионов, Мэв	1,29; 1,045; 1,045; 1,03; 1,043
Частота свободных колебаний:	
аксиальных	0,8—0,9
радиальных	1,07—1,17
Частота обращения, Мгц	4,638; 2,948; 2,948; 3,377; 2,948
Кратность частоты ускоряющего напряжения	2
Число основных дуантов	2
Амплитуда ускоряющего напряжения на основных дуантах, кв	55
Число дополнительных дуантов	2
Набор энергии за оборот, квэ	200
Шаг орбит на конечном радиусе, см	0,44; 0,6; 0,6; 0,6; 0,6
Количество секторов магнитной системы	4
Вес магнитной системы, т	1000
Высота зазора электромагнитов, см	16
Максимальная мощность питания электромагнитов, квт	1500
Мощность потерь в ВЧ системе, квт	140

2. Сооружение и разработка новых крупных ускорителей

В течение последних лет было представлено довольно большое число проектов протонных синхротронов на энергию от нескольких десятков до тысячи ГэВ ^{3, 5-7, 15, 59-62}. Быстрый рост радиационных потерь электронов и отсутствие каких-либо глубоких физических оснований мешали

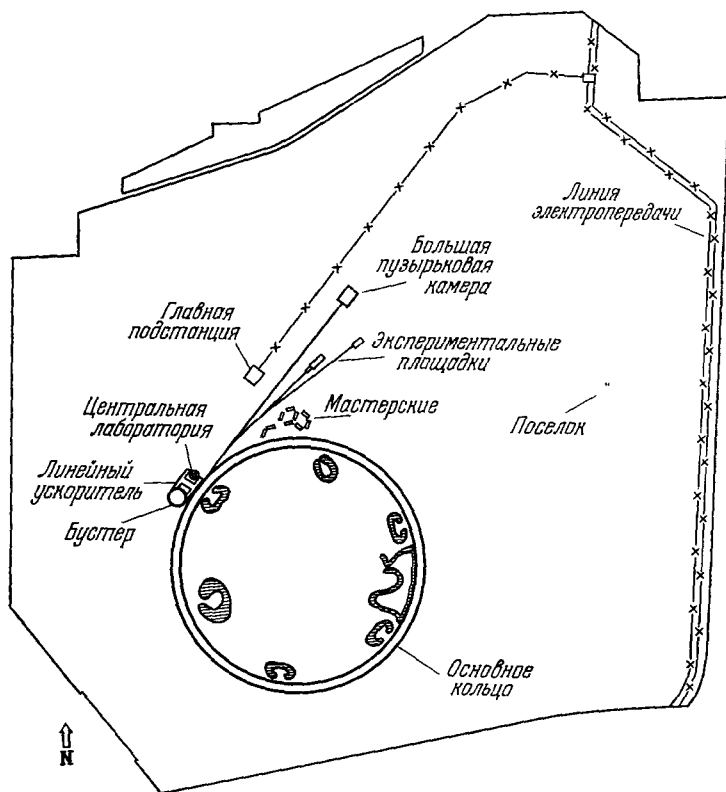


Рис 2. Схематический план лаборатории национального ускорителя¹⁸.

разработке электронных синхротронов на энергию сколько-нибудь больше 10 ГэВ . Теперь, однако, намечается повышение интереса к большим электронным синхротронам, вызванное отчасти успехами метода встречных пучков и криогеники, а отчасти смещением центра тяжести интересов в физике элементарных частиц от сильных взаимодействий к слабым.

а) Протонные синхротроны. В табл. I можно найти основные характеристики четырех наиболее разработанных проектов протонных синхротронов на энергию в интервале $10^{11} - 10^{12} \text{ эв}$. В настоящее время сооружается лишь один из них — ускоритель на 200 ГэВ ЛНУ (Батавия). Интересной особенностью этого ускорителя является большой средний радиус (1 км) и соответственно низкое максимальное значение поля (около 9 кгс). Сравнительно недорогая модернизация систем питания и охлаждения магнита и некоторых других узлов (в частности, ВЧ) позволит в будущем увеличить энергию ускоренного пучка до 400 ГэВ

или несколько больше¹⁶. Ускоритель снабжен бустером на энергию 8 Гэв, работающим с частотой повторения 15 гц^{17, 18}. Инжектором для бустера является линейный ускоритель на энергию 200 Мэв, первые секции которого уже работают⁶³. На рис. 2 схематически изображено взаимное расположение основных компонентов ускорителя.

На первой стадии работы ускоритель будет иметь один выведенный протонный пучок¹⁹, который будет последовательно расщепляться для облучения всех экспериментальных площадей (рис. 3). Один из экспериментальных залов (на прямом пучке) предназначен для 25-футовой водородной камеры, которая будет использоваться главным образом для нейтринных экспериментов. Второй экспериментальный зал площадью 7500 м² предназначен для долговременного использования шести пучков нейтральных и заряженных частиц с импульсами в интервале от 20 до 200 Гэв/с. Сооружение этого зала будет закончено раньше других, к весне 1972 г.

В 1970 г. ожидается окончательное решение вопроса о сооружении протонного синхротрона ЦЕРН на 300 Гэв. Уже созданная дирекция сооружения во главе с Дж. Адамсом активно работает в настоящее время над тем, чтобы учесть возможное влияние последних достижений, полученных в криогенике при разработке других ускорителей (в частности, кибернетического) на свой проект⁶⁴.

б) Э л е к т р о н н ы е с и н х р о т р о н ы. В докладе Орлова (см. ⁴¹) рассматривается возможность создания электронного синхротрона с размножением частиц (за счет электромагнитного каскада) и с встречными электрон-позитронными пучками на энергию порядка 100 Гэв для частиц каждого знака. На рис. 4 приведена схема размножения частиц и их ускорения сначала в линейном ускорителе до энергии 400 Мэв, затем в бустере до энергии 10—20 Гэв и, наконец, в основном кольце ускорителя.

Сооружение большого электронного синхротрона на энергию 15 Гэв рассматривается также в проекте лаборатории Дарсбери⁴⁰. Синхротрон NINA в этом проекте является источником электронов с энергией 3 Гэв. Разработана оригинальная схема заполнения всей орбиты большого синхротрона (длина орбиты которого в 6 раз больше периметра синхротрона NINA)⁶⁵. В качестве ускоряющих станций предлагается использовать два линейных ускорителя на бегущей волне. Для удешевления проекта существует возможность использования имеющегося экспериментального зала и для большого ускорителя.

Хотя ни один из проектов больших электронных синхротронов не получил еще своего утверждения и еще не ясно, найдутся ли для них источники финансирования, однако можно ожидать, что интерес к ним под давлением новых фактов будет возрастать очень быстро. В табл. II приведены основные параметры обоих вышеупомянутых синхротронов.

в) Л и н е й н ы е у с к о р и т е л и. Наиболее перспективно использование сооружаемой в Лос-Аламосе «мезонной фабрики» — линейного протонного ускорителя с варьируемой энергией⁸⁶. Строительство его началось в октябре 1968 г. Стоимость всего комплекса оценена в 26 млн. долларов. В настоящее время почти закончена подготовка площадки и сооружение ряда зданий (в том числе здания инжектора). Туннель сооружен на 75%.

Основные характеристики ускорителя: максимальная энергия 800 Мэв, интенсивность $6 \cdot 10^{15}$ протонов/сек, скважность 6%.

В табл. VIII приведены данные о потоках вторичных частиц, ожидаемых от этого ускорителя. Получение первого ускоренного пучка ожидается

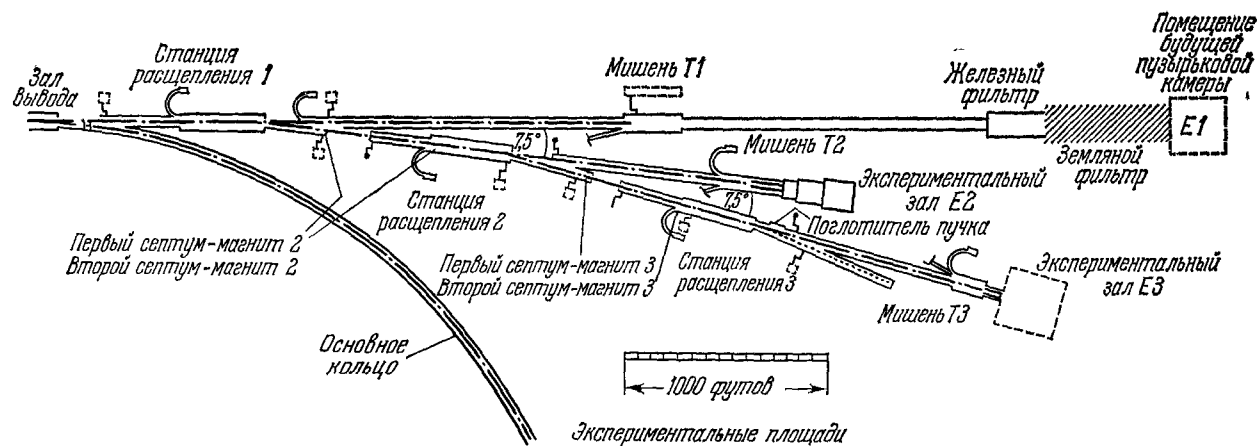


Рис. 3. Схема разводки выведенного пучка синхротрона лаборатории Национального ускорителя²⁷.

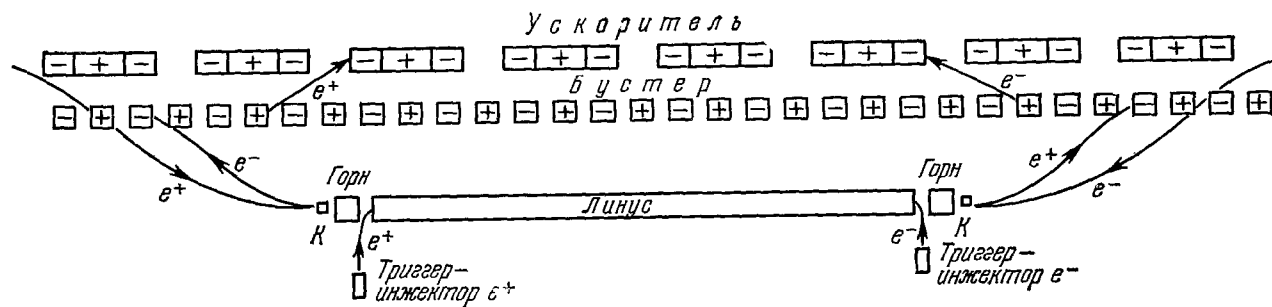


Рис. 4. Схема размножения частиц в проекте электроно-позитронного синхротрона на энергию 10—20 Гэв⁴¹.

Т а б л и ц а V I I I
Пучки Лос-Аламосской «мезонной фабрики»

Частицы	Поток, частиц/сек	Сечение пучка, см ²	Энергия, Мэв	E_0/E , %
ρ	$6 \cdot 10^{15}$	6	800	0,75
π^+	$2 \cdot 10^{10}$	12	300	7,0
π^-	$4 \cdot 10^9$	12	300	7,0
μ^+	$4 \cdot 10^9$	200	250	25,0
μ^-	$8 \cdot 10^8$	200	250	25,0

в июле 1972 г. Усилия лабораторий, занимающихся разработкой электронных линейных ускорителей, сосредоточены в настоящее время на перспективе использования криогенных методов (см. гл. III).

3. У с к о р и т е л и с о в с т р е ч н ы м и п у ч к а м и

В области ускорителей со встречными пучками ситуация прямо противоположна той, которая существует для синхротронов. Здесь накопители электронов и позитронов занимают доминирующее положение по сравнению с накопительными кольцами для протонов и других частиц. В то время как первые уже дают ценные результаты в экспериментах со сталкивающимися пучками, вторые только сооружаются. Можно указать две главные причины такого положения:

1) Метод встречных пучков эффективен лишь при энергиях сталкивающихся частиц много больше их энергий покоя. Для тяжелых частиц такие энергии стали доступны сравнительно недавно и само их получение связано с сооружением весьма дорогостоящих ускорителей.

2) Отсутствие радиационных потерь энергии при ускорении тяжелых частиц (которое так облегчает сооружение протонных синхротронов) приводит к тому, что в накопителях тяжелых частиц, вообще говоря, отсутствует механизм некогерентного затухания. Накопление частиц осуществляется заполнением всех новых участков фазового пространства. Для истинного накопления (в один и тот же объем фазового пространства) приходится создавать искусственный некогерентный механизм потерь энергии — электронное охлаждение^{66, 67}. Лидером в области как электронных, так и протонных накопителей является несомненно Институт ядерной физики СО АН СССР, где под руководством Будкера создано и создается целое семейство накопителей, а также изучаются процессы, происходящие при накоплении⁶⁸⁻⁷¹. Ведущее положение этого института видно из табл. IX, в которой приведены основные характеристики действующих, сооружаемых и проектируемых накопителей легких и тяжелых частиц на большую энергию.

а) Н а к о п и т е л и э л е к т р о н о в и п о з и т р о н о в. Бурный период истории накопителей, связанный с открытием, пониманием и преодолением всевозможных неустойчивостей пучка, можно считать в настоящее время закончившимся. Стабильная работа накопителей в Новосибирске⁶⁸ и Орсе⁷², позволившая перейти к экспериментам со сталкивающимися пучками электронов и позитронов и получить на них замечательные результаты, показывает, что теория и практика в этой области находятся в достаточно хорошем соответствии как друг с другом, так и с характером динамики частиц в накопителях. Вместе с тем опыт накопления в области энергий сотен Мэв позволяет перейти к сооружению накопителей на энергию 1,5—3,5 Гэв.

Накопители электронов и протонов кольца

Местонахождение	Состояние (сооружается/ проект)	Частицы	Энергия, Мэв	Число колец	Диаметр, м	Апертура, см ²	Число пересечений	Показатель спада магнитного поля n	Радиус кривизны	Максимальное поле, кэс	Частота, МГц	Кратность	Излучение на обход, кэв/об	Светимость, см ⁻² сек ⁻¹
ЦЕРН														
1. Женева 1502	Сооружается (1972 г.)	p, p	28 000	2	300	5×15	8	240	79	12	9,5	30	20	$4 \cdot 10^{30}$
Франция														
2. Орсе, АСО	1965 г.	e^-, e^+	540	1	7	$6,5 \times 15$	1	0,5	1,11	16,2	27,24	2	5,5	$3 \cdot 10^{28}$
3. Сакле	Проект	e^-	600	1	Эллипс, 31×17	—	0	0,5	—	8	—	—	—	—
ФРГ														
4. Гамбург	Проект (1974 г.)	e^-, e^+	3000	2	Эллипс, 110×55	4×11	—	—	—	8,06	500	480	520	$7 \cdot 10^{32}$
Италия														
5. Фраскати	1969 г.	e^-, e^+	1500	1	33,4	6×22	6	0,5	5	10	8,6	3	90	$3 \cdot 10^{29}$
СССР														
6. Харьков	1963 г.	e^-, e^-	100	2	2	4×10	1	0,27	0,5	10	52	1	1	
7. Новосибирск, ВЭПП-1	1963 г.	e^-, e^-	130	2	1	3×4	1	0,62	0,43	10		2		$4 \cdot 10^{27}$
8. » , ВЭПП-2	1966 г.	e^-, e^+	700	1	3,5	8×14	1				18			$3 \cdot 10^{28}$
9. » , ВЭПП-3	Сооружается (1969 г.)	e^-, e^+	3500	1	24	3×7	2		8		4,03 и 76,57	1 и 19		$1,5 \cdot 10^{30}$
10. » , ВЭПП-4	Сооружается	$p, \bar{p}$	25 000	1+1	115									
США														
11. Кембридж *)	(1970 г.)	e^-, e^+	3500	1	75	3×14	1	91		7,6	476	360		10^{31}
12. Стоутон, Вис	1968 г.	e^-, e^+	240	1	3,2	2×5	1	—	0,64	12,3	32	1	5	
13. Стэнфорд	Проект	e^-, e^+	1500— 3000	2	71,8	6×25	2	—	—	7,8	50	36	560	$(1-2) \cdot 10^{32}$
14. Батавия	Проект	p, p	100 000	2	667	$2,5 \times 6,3$	6	—	168,5	20	53,1			10^{32}

*) Накопление в кольце ускорителя СЕА.

Доклад Аммана и др.⁷³ посвящен опыту работы накопителя Национальной лаборатории Фраскати (Adone) с двумя пучками. На рис. 5 приведены экспериментальные данные по измерению светимости установки. Светимость оказалась примерно вдвое выше, чем оцененная по величине тока и поперечных размеров пучков. Время жизни соответствует теоретической оценке в предположении о постоянстве поперечных размеров пучков. Из полученных данных по светимости и поперечным размерам был найден также сдвиг δn числа бетатронных колебаний, вызванный взаимодействием пучков. Величина δn (оказавшаяся между 0,05 и 0,1) близка или несколько больше ожидаемой (0,04) по теории⁷⁵. В настоящее время завершено сооружение также накопителя ВЭПП-3 на энергию 3,5 Гэв в Новосибирске⁶⁹, завершаются работы по накоплению электронов и позитронов с энергией $\sim 3,5$ Гэв в кольце Кембриджского ускорителя³⁰, и в этом году начнется строительство и будут размещены заказы на оборудование для накопителя DORIS на 3 Гэв в Гамбурге³¹.

Общая схема накопителя ВЭПП-3 приведена на рис. 6.

Установка состоит из: а) импульсного форинжектора ЭЛИТ на энергию 3 Мэв с током до 3 а в импульсе длительностью 1 мксек, б) синхротрона-

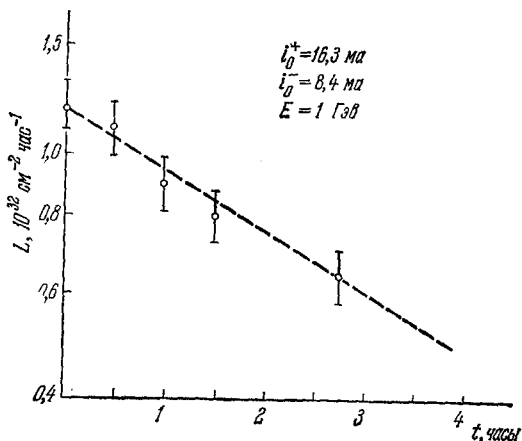


Рис. 5. Экспериментальное измерение светимости L накопителя Adone при одном сгустке в пучке.

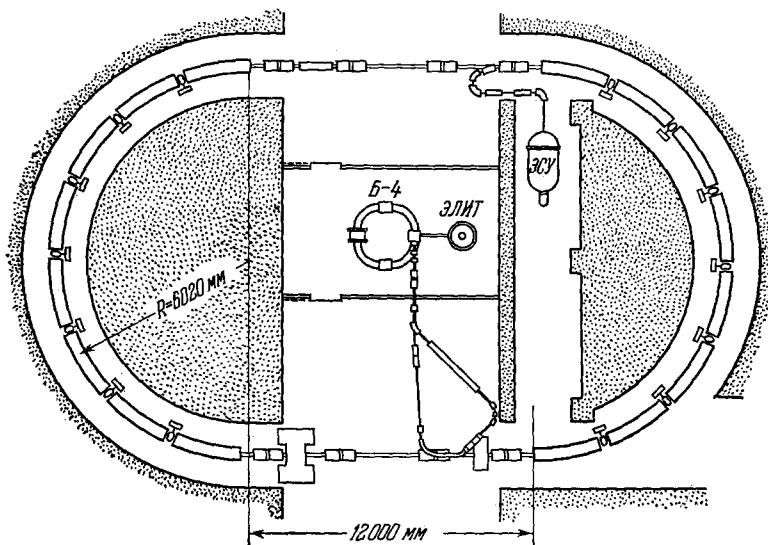


Рис. 6. Схематический план накопителя ВЭПП-3⁶⁹.

инжектора Б-4 со спиральным накоплением и последующим ускорением (бетатронным — до 10 Мэв, синхротронным — до 500 Мэв), в) электронно-оптических трактов транспортировки инжектируемых пучков, г) системы конверсии $e^- \rightarrow e^+$ и д) собственно накопительного кольца, представляющего

собой жесткофокусирующую систему из двух полуколец радиусом 802 см и двух прямолинейных промежутков длиной 12 м. Магниты накопителя подвешены к потолку туннеля (рис. 7). В настоящее время основные системы установки изготовлены, установлены на место и налажены. Накопитель протраассирован протонами с энергией 1,5 Мэв. Начаты работы по накоплению электронов в синхротроне Б-4⁸⁹.

Работы по накоплению в кольце Кембриджского ускорителя³⁰ велись до настоящего времени с электронным пучком. Экспериментально отработаны наполнение кольца за большое число циклов с ускорением и торможением электронов (было накоплено 30 мА импульсного тока), удержание пучка в кольце ускорителя (время удержания при 2,5 Гэв 2,5 часа,

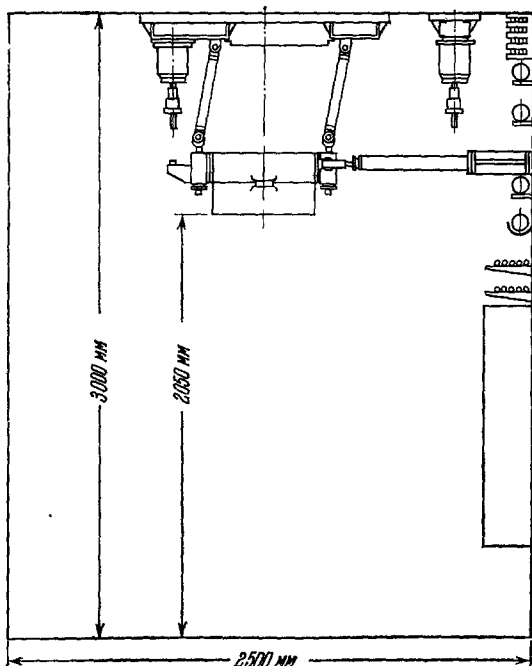


Рис. 7. Поперечное сечение туннеля накопителя ВЭПП-3⁸⁹.

время уменьшения интенсивности в e раз—45 мин), переброска пучка в байпас (bypass) и обратно. На рис. 8 (верхние две строки) показаны осциллограммы тока пучка в байпасе и в основном кольце. Видно, что переброс осуществляется практически без потерь. Однако время жизни при прохождении через байпас оказывается существенно меньше из-за ограничения в горизонтальной апертуре и увеличения ширины пучка. Наблюдавшееся время распада пучка было равно 25 сек.

К концу нынешнего года будет запущен новый позитронный инжектор на энергию 130 Мэв (он будет ускорять также электроны до энергии 250 Мэв). В следующем году планируются эксперименты по накоплению позитронов и изучению взаимодействия пучок — пучок.

Отличительной особенностью накопителя DORIS является наличие двух отдельных дорожек для электронов и позитронов, расположенных друг над другом. Пучки будут пересекаться в вертикальной плоскости в середине двух прямолинейных промежутков длиной 60 м. Инжекция в накопитель может осуществляться либо из синхротрона DESY, либо из нового линейного ускорителя на энергию 400 Мэв. На рис. 9 приведено взаимное расположение ускорителя и накопителя DORIS. Планируемая светимость накопителя (при токах 1а в каждом пучке) составляет $10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ при энергии 3 Гэв. Завершение сооружения и запуск накопителя планируются на 1973 г.³¹

Электронные накопители находят себе также применение и для других целей. Группа Сакле разработала интересный проект использования накопителя для растяжки пучка линейного ускорителя³⁴. Мы не будем останавливаться на этом проекте, так же как и на других интересных предложениях (проект асимметричных накопительных колец в Стэнфорде³⁵, проект Орса накопителя с компенсацией пространственного заряда⁷⁶ и других).

б) **Накопители протонов.** В настоящее время начато сооружение двух протонных накопительных систем — протон-антипротонного накопителя на энергию 25 Гэв в Новосибирске⁷⁷ и пересекающихся протонных колец ISR на энергию 28 Гэв в Женеве⁷⁸.

Проект последнего ускорителя не претерпел сколько-нибудь значительных изменений по сравнению с состоянием, о котором докладывалось на VI Международной конференции по ускорителям⁹⁷. Поэтому мы не будем повторять здесь его описания, ограничившись лишь состоянием дел и некоторыми характерными деталями, не привлекавшими раньше достаточно внимания.

Сооружение ISR начато в 1966 г., завершение проекта планируется на 1971 г. В настоящее время почти весь туннель сооружен, и примерно на половине его периметра установлено оборудование. Две трети магнитов уже собраны, и измерены их характеристики (ни один магнит не вышел за допустимые пределы отклонений). Система питания магнитов изготовлена и проходит заводские испытания. К концу 1969 г. она должна была быть получена. Для того чтобы накопленный пучок не терялся, система питания должна обеспечить очень высокую степень стабильности тока в обмотках ($\pm 2,5 \cdot 10^{-5}$ в течение двух месяцев и $\pm 7,5 \cdot 10^{-6}$ в течение двух минут).

Все главные части высокочастотной системы получены и монтируются. Установка их должна была начаться в сентябре 1969 г. Ускоряющие резонаторы снабжены новой системой обратной связи для подавления наводимого пучком напряжения (сигнал получается с широкополосных индукционных электродов). Компоненты вакуумной системы уже получены. Каждый узел откачивается и проверяется до установки на месте. Без прогрева насосы обеспечивают откачку до 10^{-8} тор. Первый прогрев на кольце обеспечил разрежение $2 \cdot 10^{-10}$ тор. В октябре 1969 г. установлена вакуумная камера в первой области взаимодействия. Четыре титановых насоса с охлаждением жидким азотом должны обеспечить давление 10^{-11} тор. Закончено примерно на две трети сооружение туннелей для транспортировки пучков. В них начата установка оборудования трактов транспортировки.

Важное значение придается системе наблюдения и контроля за пучком. Кольца будут снабжены следующими устройствами наблюдения:

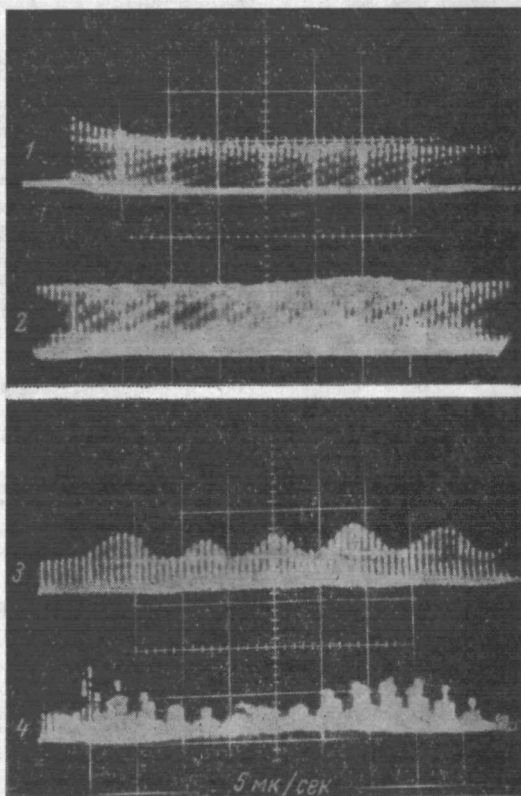


Рис. 8. Осциллограммы пучка в кольце СЕА и байпасе³⁰.

1 — ток в байпасе; 2 — ток в синхротроне; 3 — вертикальное смещение пучка в синхротроне; 4 — горизонтальное смещение пучка в синхротроне.

около 100 «пик-ап» (pick-up)-электродов⁸⁰, по одному (на каждое кольцо) широкополосному трансформатору тока пучка (с полосой от 0 до 50 МГц)⁸¹ и две газовые занавески для наблюдения профиля пучка. Несколько датчиков пучка разработано для систем транспортировки и инжекции⁸². Разработано устройство для автоматического измерения горизонтальной и вертикальной частот бетатронных колебаний⁸³.

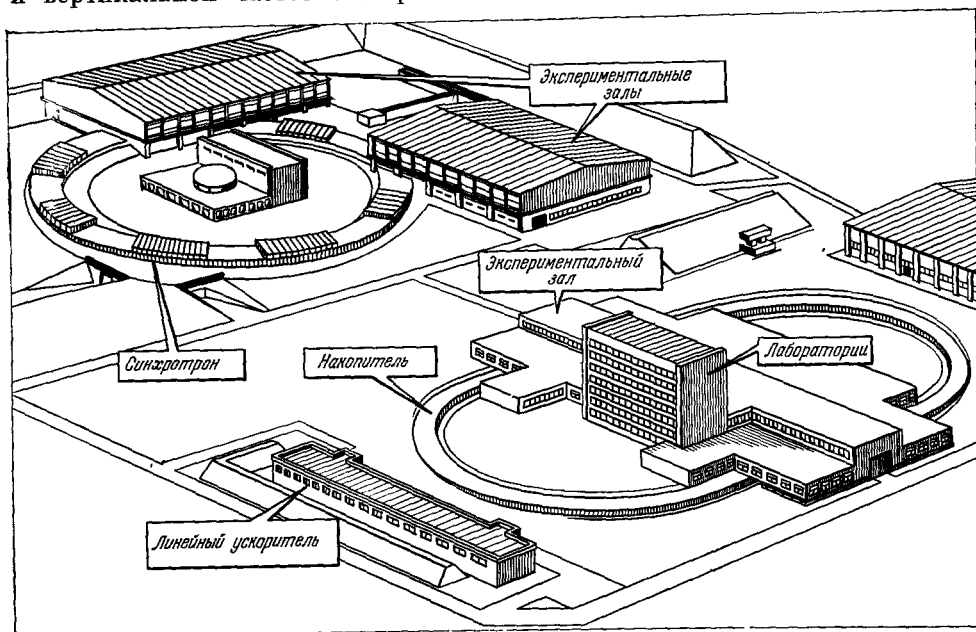


Рис. 9. План расположения ускорителя и накопителя DORIS⁸¹.

Газовая занавеска является, по-видимому, наиболее оригинальным устройством, используемым на IRS. На рис. 10 приведена схема работы

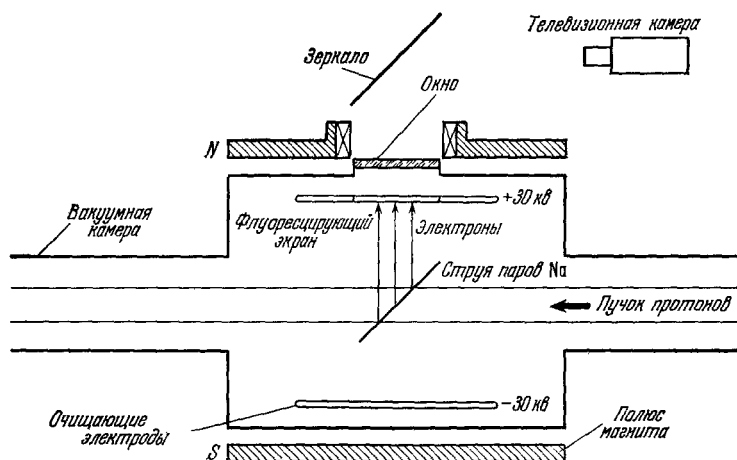


Рис. 10. Схема работы устройства, используемого в ЦЕРН для измерения поперечных размеров пучка протонов⁷⁸.

этого устройства. Плоская струя паров натрия (с размерами $70 \times 1 \text{ мм}^2$) испускается сверхзвуковым соплом из одной стороны вакуумной камеры, и неиспользованная ее часть (99,9%) конденсируется на другой ее сто-

роне. Электроны, оторванные от молекул в столкновениях с циркулирующим протонным пучком, ускоряются вертикальным электрическим полем (4 кэ/см) и фокусируются магнитным полем (300 гс) на флуоресцирующий экран. Яркость изображения пучка, с которого снимаются как горизонтальные, так и вертикальные размеры, при проектном токе пучка ($4 \cdot 10^{14}$ протонов) будет сравнима с яркостью свечи. Ожидаемое разрешение порядка 1 мм .

Проект пересекающихся накопительных колец протонов лаборатории Национального ускорителя США на энергию 100 Гэв в каждом пучке ⁸⁴ во многом напоминает ISR.

Некоторые отличия (шесть областей пересечения вместо восьми, угол пересечения 50 мрад вместо 15° и другие) скорее второстепенны. В табл. IX приведены основные параметры этого накопителя.

В заключение нам кажется интересным отметить оригинальный проект установки для наблюдения столкновения пионов и мюонов друг с другом — так называемый пресетрон ⁸⁵. Идея устройства иллюстрируется на рис. 11. Короткий импульс протонов с энергией 800 Мэв и интенсивностью $6 \cdot 10^{15}$ протонов рождает в мишени свыше 10^{13} π^+ и π^- -мезонов с импульсами

в интервале $310\text{—}350 \text{ Мэв/с}$. Мишень расположена в центре импульсного магнитного поля напряженностью 400 кгс в области с радиусом $\sim 5 \text{ см}$. Пионы за время жизни совершают примерно 100 оборотов.

Для получения сколько-нибудь заметного числа столкновений необходим ускоритель с очень высокой мгновенной мощностью пучка. Оценки показывают, что для ускорителя с мгновенной мощностью, в 60 раз большей мощности Лос-Аламосской мезонной фабрики ⁸⁶ (при той же средней мощности), можно ожидать два $\pi\pi$ -взаимодействия в час. Аналогичные условия будут выполняться для столкновений распадающих мюонов.

III. НОВЫЕ МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ

Трудности создания новых ускорителей на большую энергию связаны в конечном счете с ограниченностью величин напряженностей электрических и магнитных полей, которые удается создать традиционными методами (при разумных затратах). Эта ограниченность приводит к увеличению размеров ускорителей, а следовательно, к росту стоимости и повышению требований на точности изготовления, установки и поддержания различных узлов и параметров ускорителей.

Можно выделить три основных направления разработок, целью которых являются попытки преодолеть эти трудности и сделать ускорители дешевле и составляющие содержание термина «новые методы»:

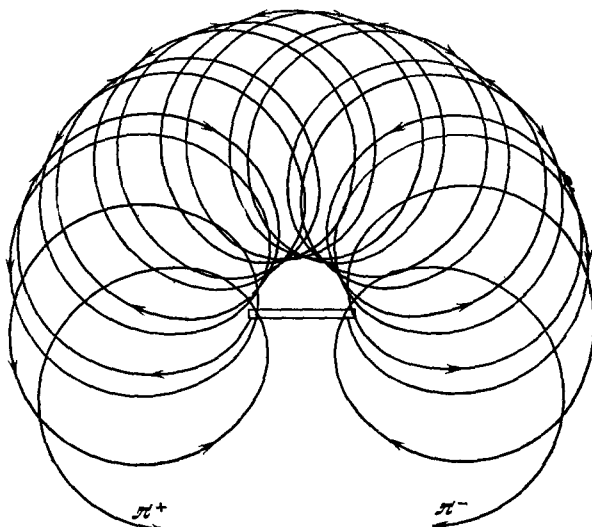


Рис. 11. Схема движения частиц в пресетроне — предлагаемом приборе для наблюдения столкновений пионов и мюонов ⁸⁵.

- 1) использование коллективных полей сгустков или плазмы;
- 2) использование низких температур;
- 3) использование кибернетических методов.

Каждое из этих направлений имеет свои достоинства и успехи, но также и свои недостатки. Однако следует заметить, что уже сейчас стоимость самого ускорителя составляет примерно половину всех затрат на его содержание и оснащение. Поэтому развитие новых методов ускорения должно идти параллельно разработке новых методов также и в области детектирования и регистрации частиц сверхвысоких энергий.

1. У с к о р е н и е к о л л е к т и в н ы м и п о л я м и

В основе таких методов ускорения лежит идея использования полей плотных образований частиц (сгустков, потоков, плазмы). Напряженности этих полей могут быть сделаны на один-два порядка больше, чем удается получить обычными методами. Главная трудность, которую при этом нужно преодолеть, — неустойчивость плотных сгустков или плазмы, возникающая из-за взаимодействия частиц друг с другом.

Исследования по коллективным методам ускорения начали развиваться после опубликования работ Векслера по когерентным методам⁸⁷, Будкера по автостабилизированным пучкам⁸⁸ и Файнберга по ускорению в плазме⁸⁹, хотя некоторые идеи⁹⁰ возникли уже давно. Мы остановимся здесь лишь на результатах, полученных в наиболее развитых методах ускорения, отослав читателя к обзорам Рабиновича⁹¹ и Файнберга⁹², где содержится изложение разнообразных, но пока слабо разработанных модификаций коллективного метода ускорения (рассеяние электронного пучка магнитным полем плазменного сгустка, лидерное ускорение в краевом поле пробоя, ускорение сканирующим или вращающимся электронным лучом, ускорение в движущихся вдоль пучка магнитных пробках; см. ^{93, 94}, а также описание всевозможных неустойчивостей и методов их подавления (см. также ⁹⁵).

а) У с к о р и т е л и с э л е к т р о н н ы м и к о л ь ц а м и.
Основные принципы конструкции и работы такого ускорителя были изложены в работе⁹⁶. В этом методе ионы захватываются потенциальной ямой плотного сгустка релятивистских электронов, имеющего тороидальную форму. Было сообщено также об успешном формировании и сжатии колец, а также о наполнении их ионами.

В докладе на конференции Саранцев⁹⁷ сообщил о новом успехе своей группы — кольца были выведены из адгезатора и ускорены в спадающем магнитном поле вместе с содержащимися в них ионами азота. Оценка нижней границы энергии ионов и их интенсивности была получена из реакции образования α -радиоактивного ТЬ при бомбардировке азотом Се. Энергия ионов ≥ 60 Мэв (4 Мэв/нуклон), их интенсивность $\geq 10^8$ ионов/имп.

Для обеспечения устойчивости электронного сгустка на первых участках его ускорения разработана и применялась дополнительная фокусировка силами изображения в экране⁹⁸. Движение сгустка происходит в металлической трубе, имеющей разрезы вдоль направления движения кольца. Такая система уводит частоту колебаний электронов от наиболее опасного резонанса и поддерживает постоянство размеров сгустков, что необходимо для удержания в нем ионов.

Аналогичная установка для получения тяжелых многозарядных ионов создается в Беркли⁹⁹. В настоящее время там ведутся работы по формированию и сжатию электронных колец и сооружается новый линейный индукционный ускоритель на большой ток. Этой группе уда-

лось пока получить устойчивые электронные кольца с числом электронов $4 \cdot 10^{12}$ и нагрузить их ионами. Работы в этой области начинаются также в Карлсруэ и Мюнхене.

Возможность получения ионов высоких энергий на ускорителях с электронными кольцами зависит от характера потерь энергии кольцевым сгустком при прохождении его через ускоряющую систему. Теоретические исследования этого вопроса¹⁰⁰⁻¹⁰³ пока не согласуются между собой¹⁰⁴, давая широкий спектр зависимостей потери энергии от энергии частиц (от E_0 до E для одиночного резонатора).

Ускорители с электронными кольцами могут в перспективе позволить создать компактные протонные ускорители на большую энергию. Большие возможности они имеют также в качестве интенсивных источников многозарядных тяжелых ионов.

б) Получение мощных токов электронов. Дальнейшее развитие коллективных методов ускорения связано с развитием техники получения сверхмощных потоков электронов. В настоящее время получены импульсные токи электронов с мощностью в пучке до 10^{12} *вт* *). Длительность импульса такого тока составляет несколько сотых долей *мсек*, энергия электронов — несколько *Мэв*, ток — несколько сот *ка*¹⁰⁶.

В обзоре¹⁰⁷ рассматриваются перспективы получения и использования интенсивных токов для ускорения частиц, а также анализируются возможные механизмы ускорения ионов коллективным полем больших токов электронов. В работе¹⁰⁸ наблюдались протоны с энергиями 5 *Мэв*, ионы He с энергией 9 *Мэв* и ионы N с энергией 20 *Мэв*, ускоренные импульсным током электронов порядка 50 *ка* с энергией 1,3 *Мэв* при длительности импульса 40 *нсек*.

Импульс ионного тока был существенно короче (3—10 *нсек*) и соответствовал ускорению одного иона на каждые $3 \cdot 10^3$ электронов. Аналогичные результаты получены и в других работах.

В качестве механизмов ускорения ионов рассматривались: 1) черенковское излучение ионами плазменных волн, 2) ускорение волной пространственного заряда. Результаты расчетов обоих механизмов не противоречат экспериментальным данным, хотя и те, и другие пока еще слишком грубы.

Оценки показывают возможность получения ускоряющих полей порядка 10^6 *в/см* и кинетических энергий ускоренных ионов порядка $(\gamma_0 - 1)Mc^2$, где γ_0 — относительная энергия электронов, Mc^2 — энергия покоя иона.

в) Плазменные методы ускорения. Вторым направлением коллективных методов ускорения, усиленно развиваемым главным образом группой Я. Б. Файнберга, является ускорение ионов в плазме. При выполнении определенных условий распространяющаяся в плазме волна плотности заряда может захватить и ускорить часть ионов плазмы. Преимущества такого метода состоят в том, что: 1) отсутствие релятивистского поперечного движения электронов приводит к увеличению эффективного ускоряющего поля, 2) ускоренные частицы в принципе получают квазинепрерывно, а не сверхкороткими импульсами, как в ускорителе, с электронными кольцами. С другой стороны, плазменное ускорение требует существенно большей запасенной в пучках или в плазме электромагнитной энергии, так как она оказывается распределенной по всей области распространения волны (при одинаковых напряженностях ускоряющего поля).

*) Генераторы электронных пучков мощностью порядка 10^{10} *вт* выпускаются промышленностью¹⁰⁵ (ток 10^4 *а*, энергия до 2 *Мэв*, длительность импульса до 50 *нсек*).

Необходимые для ускорения волны в плазме могут возбуждаться как электронными потоками, так и внешними высокочастотными полями. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что $\sim 30\%$ энергии пучка идет на возбуждение колебаний. Переход от пучков с мощностью 10 *квт* к пучкам с мощностью порядка мегаватт не изменяет относительной величины энергии, идущей на возбуждение волн. В настоящее время начаты эксперименты с еще более мощными пучками 30—50 и 300—800 *Мвт* с длительностью импульса 200—500 *нсек* ⁹².

Одной из главных трудностей, которую необходимо преодолеть для успешного использования плазменного ускорителя, является возникновение неустойчивостей как самой плазмы, так и пучка ускоряемых частиц. Как показано в работе ⁹², одним из эффективных методов управления пучковыми неустойчивостями является предварительная модуляция электронных потоков. Управление интенсивными колебаниями может быть осуществлено наложением на вход системы регулярного сигнала с мощностью, составляющей лишь 10^{-5} мощности возбуждаемых колебаний. Результаты нелинейной теории взаимодействий модулированных электронных пучков с плазмой изложены в работе ⁹⁴. Важные результаты получены также по подавлению дрейфовой неустойчивости плазмы внешним высокочастотным электрическим полем.

К ускорению плазмой можно отнести, по-видимому, также явления, наблюдавшиеся в работе ¹⁰⁹. В ней наблюдались ионы с энергиями 10—20 *Мэв* при образовании импульсных электронных токов порядка $10^3 - 10^4$ *а* из плазмы. При этом энергии электронов были всего 200—300 *кэв*. Число ускоренных ионов составляло $10^{11} - 10^{12}$ в импульсе.

2. Низкотемпературные методы в ускорителях

Использование криогеники дает возможность не только снизить эксплуатационные расходы за счет уменьшения диссипируемой энергии, но и существенно увеличить величину напряженности поля и соответственно уменьшить размеры и стоимость сооружения ускорителя. Этот путь уменьшения затрат на ускорители привлекателен еще и тем, что он может быть использован также и для снижения стоимости экспериментального оборудования и соответственно размеров и стоимости экспериментальных залов.

а) Криогенные и сверхпроводящие магниты. Получение сплавов, способных сохранять сверхпроводящее состояние при сверхсильных магнитных полях (десятки *кгс*) стимулировало интенсивные исследования возможностей создания сверхпроводящих магнитов для ускорителей. Главная трудность заключается здесь в уменьшении диссипативных потерь переменного тока. В ускорителях с быстроменяющимся магнитным полем эти потери требуют существенного увеличения мощности криостата и всякая экономическая целесообразность теряется.

Исследования, начатые вначале в Резерфордской лаборатории ¹¹⁰, а затем и в других лабораториях ¹¹¹⁻¹¹³, показали, что эта проблема, возможно, близка к решению. Конструкции экспериментальных катушек, выполненных из тонких (порядка десятков микрон) ниобий-титановых сверхпроводящих нитей, армированных нормальным металлом, давали напряженности порядка 40—60 *кгс* в объеме диаметром 4—9 *см* и позволяли изменять поле с частотой один раз в две—пять секунд, требуемой для работы синхротрона. Разработаны еще более перспективные проводники, состоящие из сверхпроводящих нитей, отделенных от меди реактивным барьером.

Другой, более радикальный путь устранения потерь при импульсном питании сверхпроводящих магнитов, рассмотрен в работах ^{114, 115, 116}. В них предлагается ускоритель, магнитное поле которого изменяется вращением сверхпроводящих магнитов с постоянным полем. В каждой паре магнитов поля направлены в противоположные стороны при низких уровнях поля, а затем по мере их поворота навстречу друг другу поле увеличивается. В работе ¹¹⁷ рассмотрена возможность создания ускорителя, магнитная система которого состоит из комбинации постоянных сверхпроводящих магнитов и переменных обычных магнитов. Не менее, а возможно, даже и более перспективным является создание магнитов (как железных, так и безжелезных) с нормальными обмотками, сопротивление которых в тысячи раз меньше обычного. Сопротивление очень чистого алюминия при температуре $4,2^\circ\text{K}$ в 14 000 раз меньше, чем сопротивление при комнатной температуре (300°K).

Криогенные железные магниты с большой плотностью тока могут оказаться более приемлемыми, нежели сверхпроводящие, поскольку: 1) для них требуются более дешевые криостаты, 2) они требуют меньше ампер-витков для возбуждения, 3) у них меньше накопленная энергия и 4) с ними легче получить требуемое пространственное распределение поля.

Эксперименты, выполненные на моделях криогенных магнитов с плотностями токов $10\text{--}20\text{ кА/см}^2$, показывают, что Al при 15°K легко может составить конкуренцию ниобий-титановому сверхпроводнику ¹¹⁸. Хорошие перспективы имеют криогенные магниты и при использовании их для вывода и сепарации пучков.

Хотя исследования еще не вышли из стадии работы на небольших моделях и остаются неясными многие важные вопросы (надежность, требования к чистоте материалов, переход от малых образцов к большим и т. д.), нетрудно предвидеть, что в недалеком будущем существующие протонные *) ускорители будут переведены на низкотемпературные магниты, а новые ускорители будут проектироваться сверхпроводящими.

б) Сверхпроводящие резонаторы. Интерес к разработке сверхпроводящих резонаторов хорошо понятен, поскольку их использование приведет к: 1) уменьшению мощности и стоимости высокочастотных ускоряющих систем вследствие устранения диссипации энергии в стенках резонаторов, 2) уменьшению размеров и стоимости ускорителей вследствие повышения напряженности ускоряющего поля (ограниченной величиной упомянутых потерь) и 3) увеличению относительной длительности импульса пучка вплоть до 100% (непрерывный пучок), также ограниченной величиной потерь в стенках.

На конференции докладывались работы по экспериментальному изучению характера поверхностного сопротивления ниобиевого ¹¹⁹ и свинцового ^{120, 121} резонаторов для разных уровней мощности и разных типов колебаний высокочастотного поля в диапазоне частот $400\text{--}4000\text{ МГц}$ и в диапазоне температур $1,5\text{--}4,2^\circ\text{K}$, а также по возбуждению сверхпроводящего резонатора непрерывным электронным пучком ¹²².

В экспериментах с одиночным резонатором получены обнадеживающие результаты: напряженность поля 27 МэВ/м и добротность 10^{11} . Разработана технология получения ниобиевого резонатора, не требующая

*) Синхротронное излучение в больших электронных синхротронах препятствует использованию больших напряженностей магнитного поля. Поэтому для электронных ускорителей на большую энергию применение криогенных магнитов нецелесообразно.

сверхчистого материала: резонатор прогревается в высоком вакууме до температуры 2000°C , затем охлаждается, и с рабочей поверхности удаляется слой толщины 10 мкм . Сверхпроводящие резонаторы, по-видимому, будут очень эффективны в высокочастотных сепаторах частиц^{123, 124}.

в) **Л и н е й н ы е с в е р х п р о в о д я щ и е у с к о р и т е л и.** Наибольшего прогресса в создании сверхпроводящих линейных ускорителей добились сотрудники лаборатории высоких энергий в Стэнфорде, где близок к завершению линейный электронный ускоритель на энергию 2 Гэв ³⁸. Параметры ускорителя можно найти в табл. II. Прототип ускорителя на энергию $1,5\text{ Мэв}$ был построен на свинцовых резонаторах. На нем был получен ток 140 мка , и было показано, что может быть получен ток 100 мка в импульсном интервале $\pm 10^{-4}$.

В настоящее время закончено сооружение туннеля. В середине следующего года будет запущена первая ниобиевая секция ускорителя на энергию 30 Мэв . Запуск всего ускорителя планируется на конец 1971 г.

Группа Иллинойского университета⁴³ сооружает линейный сверхпроводящий ускоритель на энергию 30 Мэв , который будет являться частью микротрона на энергию 600 Мэв . Частота ускоряющего напряжения равна $1,3\text{ Гц}$. Модель протонного линейного сверхпроводящего ускорителя на энергию 20 Мэв сооружается также в Карлсруэ¹²⁵.

Мы уже писали выше о планах перестройки Стэнфордского двухмильного линейного ускорителя в сверхпроводящий³². Максимальная проектная энергия (при средней напряженности ускоряющего поля 33 Мэв/м) составляет 100 Гэв . Коэффициент заполнения изменяется от 100% при 25 Гэв до 6% при максимальной энергии. Средняя мощность в пучке при энергии 100 Гэв составит 300 квт .

Наконец, упомянем проект сверхпроводящего линуса для ускорения пионов¹²⁶. Пучок пионов с интенсивностью $5 \cdot 10^{10}\text{ частиц/сек}$ от Лос-Аламосской мезонной фабрики будет ускорен от энергии 300 Мэв до энергии $1,2\text{ Гэв}$ и 9 пятиметровых сверхпроводящих секциях. Частота ускоряющего поля $402,5\text{ МГц}$, диаметр пучка 8 см . Оценки выхода ускоренных пионов дают величину $3 \cdot 10^9\text{ частиц/сек}$.

3. У с к о р и т е л и и к и б е р н е т и к а

Автоматические системы поддержания параметров и системы контроля и управления, включающие в себя вычислительные и управляющие машины, успешно используются во многих ускорителях, повышая надежность их работы, увеличивая интенсивность ускоряемых пучков и эффективность их использования.

Синхротроны CPS и AGS оснащены системами обратной связи, подавляющими когерентные синхротронные колебания. Аргонский ускоритель ZGS имеет программную управляющую систему, распределяющую выведенный протонный пучок по различным мишеням. Различной сложности подобные системы закладываются также в проектируемые и сооружаемые ускорители^{86, 127}. В Радиотехническом институте АН СССР в течение последних лет ведутся работы по созданию протонного ускорителя на энергию 1000 Гэв ⁷, стоимость которого должна быть снижена за счет развитых систем контроля за положением и колебаниями пучка. Уменьшение поперечных размеров рабочего поля, достигаемое таким способом, приводит к уменьшению сечения магнита и, следовательно, системы питания магнита и туннеля.

Для экспериментальной проверки всего комплекса вопросов, возникающих при разборе такого ускорителя, создана действующая модель

ускорителя на энергию 1 Гэв ¹²⁸. В докладе¹²⁹ сообщается о работах, проводимых на этой модели по автоматическому регулированию поперечного смещения пучка с помощью электронной управляющей машины. Доклад¹³⁰ содержит описание разработанной цифровой системы управления синхротроном.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В разработке новых методов ускорения за два года, прошедшие с момента предыдущей международной конференции по ускорителям, были получены замечательные результаты, открывающие перспективы развития ускорителей в новом интервале энергий ускоряемых частиц. Вместе с тем довольно ясно, что ни один из новых методов сам по себе не обеспечивает решения всего комплекса проблем, имеющих в этой области. По-видимому, только синтез всех новых методов является тем путем, по которому пойдет физика ускорителей. Подтверждением этому является разработка проектов, включающих в себя элементы разных направлений^{41, 73, 117, 131}. Осуществление этих проектов сталкивается с грандиозными трудностями, преодоление которых возможно лишь при условии еще более тесного сотрудничества различных лабораторий. Поиски новых плодотворных идей и методов ускорения остаются пока насущной задачей физики и техники ускорителей.

Ереванский физический институт

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Б. О к у н ь, Проблемы физики высоких энергий, I *).
2. D. D e k k e r s, II *), стр. 450.
3. CERN Study Group on New Accelerators, Report on the Design Study of a 300 Gev Accelerator, CERN, 1964, стр. 563.
4. P. B e r n a r d et al., New Facilities at Saturne, I.
5. R. L e v y - M a n d e l, II, стр. 14; см. также Internal Report GESYN 69-16, GEN 16.
6. F. A r o n d t et al., A 60 Gev Proton, Synchrotron with Separated Function Magnets, I.
7. А. Л. М и н ц, А. А. В а с и л ь е в, Э. Л. Б у р ш т е й н, Кибернетический ускоритель на 1000 Гэв — современное состояние разработок, I.
8. ИТЭ, № 4 (1962) (весь выпуск).
9. А. А. Н а у м о в, Протонный синхротрон ИФВЭ на энергию 70 Гэв . Состояние работ по наладке, первые эксперименты, I.
10. G. C. B a r n e y, Proc. IEE, 3, 1624 (1964).
11. A 7 Gev Proton Synchrotron, Pt I, Rutherford Laboratory Report NIRL(R) 144.
12. L. C. T e n g, Proc. of the Vth Intern. Conference on High-energy Accelerators, Frascati, 1965, стр. 104.
13. R. R. A d a m s et al., II, стр. 436.
14. N. C h u p p, W. W e n z e l, T. E l i o f f, Proc. of the Vth Intern. Conference on High-energy Accelerates, Frascati, 1965, стр. 117.
15. Lawrence Radiation Laboratory, 200 Gev Accelerator Design Study, UCRL-16000 (1965).
16. R. R. W i l s o n, Future Options at NAL, I.
17. F. G. S c h o e m a h e r, Main-accelerator Features, I.
18. F. T. C o l e, Plans and Progress at the National Accelerators Laboratory, I.
19. A. L. M a s c h k e, Some Remarks on Extraction and Targeting at NAL, I.
20. J. I. K i r c h g e s s n e r, The Rinceton — Pennsylvania Rapid Cycling 3 Gev Proton Synchrotron — Recent Improvements and Future Plans, I.

*) Для краткости мы обозначим цифрами I и II соответственно Труды VII и VI Международных конференций по ускорителям заряженных частиц, Ереван (1969 г.) и Кембридж, CEAL-200, CEA, Cambridge, Mass., 1967.

21. E. M. Laziev, M. L. Petrosian, High-energy Accelerators — 1969, Yerevan, 1969.
22. К. И. Губриенко и др., Пучки вторичных частиц на протонном синхротроне с энергией 70 Гэв, I.
23. B. Kuiper, B. Langeseth, K. P. Myznikov, The Fast Ejection System, in Particular Channel A of the Serpukhov Accelerator, I.
24. К. П. Мызников и др., Проект системы медленного вывода протонов из ускорителя ИФВЭ на энергию 70 Гэв, I.
25. Y. Bessonier, O. Barbalat, D. Dekkers, Status of Studies on the CPS Slow Extraction, I.
26. A. van Steenbergen, M. Month, Three Turn Resonant Fast Extraction, I.
27. A. Blewett, Future Prospect for High-energy Accelerators, Proc. of the Lund Intern. Conference on Elementary Particles, Sweden, 1969.
28. C. Bovet, K. Reich, II, стр. 315; U. Bigliani et al., Influence of the Beam Intensity on the Design of the CERN PS Booster, I.
29. K. Strauch, CEAL-1048, Cambridge, 1969.
30. G. A. Voss, Status of the CEA Bypass for Colliding Beams, I.
31. K. Steffen, Final Barometers and Status of the DESY Double Storage Ring, I.
32. B. D. McDaniel, Status of Cornell 10 GeV Accelerator Facility, I.
33. R. B. Neal, Recent Progress at SLAC, I; R. B. Neal, Доклад на Международном совещании по перспективам развития физики высоких энергий, Тбилиси, 1969.
34. J. F. Bertrand et al., Linac Beam Stretchen Alis, I.
35. B. Richter, The Stanford Positron-electron Asymmetric Rings (Spear), I.
36. J. Naimson, High Duty Factor 400 MeV High Resolution Electron Linear Accelerator, I.
37. F. Netter, The High Duty Cycle Saclay Electron and Proton Linac, I.
38. E. E. Chambers, Status and Development of Superconducting 2 GeV Accelerator at HEPL, I.
39. W. B. Hermansfeld, G. A. Loew, R. B. Neal, Two Mile Superconducting Accelerator Study, I.
40. M. C. Crowley-Milling, An Electron Synchrotron for 15—20 GeV, I.
41. А. И. Алиханьян и др., Электронно-позитронный синхротрон с размножением частиц, I.
42. Ю. М. Волков и др., Ускоритель типа микротрона квазинепрерывного действия на энергию электронов 400 Мэв, I.
43. A. O. Hanson et al., Design of a 600 MeV Superconducting Microtron, I.
44. L. Gonella et al., Preliminary Report on a 500 MeV Linacpowered Racetrack Microtron for the Universities of North West Italy, I.
45. Н. К. Абросимов и др., Синхроциклотрон ФТИ АН СССР на энергию протонов 1 Гэв, I.
46. Н. К. Абросимов и др., Высокочастотная система синхроциклотрона ФТИ АН СССР на энергию протонов 1 Гэв, I.
47. Б. Е. Грицков и др., Электромагнит синхроциклотрона ФТИ АН СССР на энергию протонов 1 Гэв, I.
48. И. Ф. Малышев и др., Особенности устройства вакуумной камеры и резонансной системы синхроциклотрона ФТИ АН СССР, I.
49. Б. И. Замолодчиков, Развитие циклотронного метода ускорения: релятивистский и моноэнергетический циклотроны (обзор), I.
50. J. P. Blaser et al., The SIN Ring Cyclotron Project. Status Report, I.
51. E. W. Vogt, J. H. Richardson, IEEE Trans., Nucl. Sci. NS-13, 262, 426 (1966).
52. В. И. Аносов и др., Препринт ОИЯИ Р9-378, 7 Дубна, АЭ 25 (6), 539 (1968).
53. И. Я. Барит и др., Спектрометрический изохронный циклотрон с регулируемой энергией частиц, I.
54. Н. И. Венников и др., Проект лаборатории изохронного циклотрона Института атомной энергии им. И. В. Курчатова, I.
55. А. А. Глазков и др., Препринт ОИЯИ Р9-3932, Дубна, 1968.
56. A. G. Blosser, M. M. Gordon, Nucl. Instrum. 13, 2 (1961).
57. Ю. Г. Басаргин, Р. Н. Литиновский, О. А. Миняев, О получении монохроматических пучков с использованием циклотронного способа ускорения, I.
58. R. S. Livingston, J. A. Martin, A System for Heavy Ion Acceleration Using a Separated-Sector Isochronous Cyclotron, I.
59. A. L. Mints, A. A. Vasiliev, E. L. Burshtein, II, стр. 4.
60. S. Suwa et al., II, стр. 8.
61. Verslag zum Bau eines 40 GeV Protonensynchrotrons, IEKP (Karlsruhe), 1967; см. также: W. Heinz, II, стр. 54.
62. R. R. Wilson, II, стр. 210.

63. C. D. Curtis et al., The Operation of the First Sections of the 200 Mev Linear Accelerator for the 200 Gev Synchrotron, I.
64. J. B. Adams, Доклад на Международном совещании по перспективам развития физики высоких энергий, Тбилиси, 1969.
65. Preliminary Design Study for a 15—20 Gev Electron Synchrotron: NINA Booster, DENPL/R2 (1968).
66. S. C. C. Ting, J. Proc. of the 14th Intern. Conference on High-Energy Physics in Vienna, CERN, Geneva, 1968, стр. 43.
67. W. Mager, Proton Beam Cooling with Electrons in the Relativistic Case, I.
68. В. Л. Ауслендер и др., Реконструкция установки со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2, I.
69. В. Л. Ауслендер, Г. И. Будкер, И. Я. Протопопов, А. Н. Скринский, Установка со встречными электрон-позитронными пучками на энергию 3,5 Гэв (ВЭПП-3), I; Г. И. Будкер, И. Я. Протопопов, А. Н. Скринский, II, стр. 102.
70. Г. Н. Кулипанов, С. И. Мишнев, А. Н. Скринский, Поведение пучка в накопителе при совместном действии двух резонансов бетатронных колебаний, I; Г. Н. Кулипанов, С. И. Мишнев, А. Н. Скринский, Изучение стохастической неустойчивости пучка при периодическом прохождении резонанса бетатронных колебаний, I.
71. Н. С. Диканский и др., Изучение прохождения частиц через область автофазировки бетатронных колебаний за счет радиационного затухания, I; Я. С. Дербенев, Н. С. Диканский, О демпфировании когерентных колебаний пучка в накопителе, I.
72. а) H. Zungier et al., Developuent and Beam Studies on ACO, I; б) P. C. Martin et al., II, стр. 64.
73. F. Amman et al., Single and Two Beam Operation in ARONE, I.
74. G. A. Loew et al., Linac Beam Interactions and Instabilities, I.
75. E. Courant, BNL Internal Report AADD-69 (1965).
76. R. Belbèoch, A multi Gev Electron-positron Colliding Beam System with Space-Charge Compensation, I.
77. Г. И. Будкер, Ускорители и встречные пучки, I; G. I. Budker, International Symposium on Electron and Position Storage Rings, Saclay, 1960.
78. K. Johnsen, 28 Gev Intersecting Proton Storage Rings at CERN, I.
79. K. Johnsen, II, стр. 58.
80. J. Borer, R. Scholl, CERN Report ISE-RE(CO) 69-55 (1969).
81. K. Unser, Proc. of the US National Particles Accelerators Conference, 1969 (будет опубликовано).
82. D. A. Neet, *ibid.*
83. S. Hansen, W. Schnell, CERN Report ISR-RF/69-3 (1969).
84. L. G. Teng, Colliding-beam Storage Rings for the NAL Synchrotron, I.
85. R. Masek, B. Maglic, Pracetron — a Principle for Obtaining Pion-pion and Muon-muon Collisions, I.
86. L. Rosen, Design and Construction Status of the Los Alamos Meson Physica Facility, I.
87. В. И. Векслер, Proc. of the 1st Intern. Conference on Particle Accelerators, CERN, Geneva, vol. I, 1956, стр. 80; АЭ 2, 427 (1957).
88. Г. И. Будкер, *ibid.* Proc., стр. 68.
89. Я. Б. Файнберг, *ibid.* Proc., стр. 84.
90. W. H. Bennett, Phys. Rev. 45, 89 (1934); Н. Alfven, Phys. Rev. 55, 425 (1939).
91. М. С. Рабинович, Труды Всесоюзной конференции по ускорителям, Москва, 1968.
92. Я. Б. Файнберг, Ускорение частиц в плазме, I.
93. Е. Г. Комар, Ускорение положительно заряженных частиц вращающимся электронным лучом, I.
94. В. И. Курялко, Взаимодействие модулированных пучков с плазмой, I.
95. Л. С. Богданкевич, А. А. Рухадзе, Теоретическое исследование устойчивости сильноточных электронных пучков в плазме и проблема критических токов, I.
96. В. И. Векслер и др., II, стр. 289.
97. В. П. Саранцев, Ускоритель с электронными кольцами, I.
98. Г. В. Долбилов и др., Рокусировка электронного кольца в линейном коллективном ускорителе ионов системой типа «беличье колесо», I; см. также раппортерский доклад: И. Н. Иванов, Вопросы формирования и устойчивости электронных колец, I.
99. D. Keefe, ERA Development at Berkeley, I.
100. Г. В. Воскресенский, В. Н. Курдюмов, О потерях энергии электронных колец при пролете одиночного резонатора, I.

101. J. D. L a w s o n, How Can we Calculate Radiation Loss in the Electron Ring Accelerator?, I.
 102. А. Г. Б о н ч - О с м о л о в с к и й, В. И. Ц и т о в и ч, К теории радиационной неустойчивости релятивистских заряженных кольцевых сгустков, I.
 103. E. K e i l, On the Energy Loss of a Charged Ring Passing a Corrugated Cylindrical Waveguide, I.
 104. J. D. L a w s o n, Rapp. talk: Radiation from Relativistic Electron Rings Passing through Cavities, I.
 105. F. M. C h a r b o n n i e r et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-14 (3), 789 (1967).
 106. A. M. S e a s l e r, The Acceleration of Particles by Collective Fields, I.
 107. N. R o s t o k e r, Intense Nev Electron Beams and Prospects for Accelerators, I.
 108. S. E. G r a y b i l l, J. R. U g l u m, J. Appl. Phys (будет опубликовано).
 109. А. А. П л ю т т о, К. В. С у л а д з е, В. И. Р ы ж к о в, Ускорение ионов при формировании сильноточных пучков электронов из плазмы, I.
 110. J. D. L a w s o n, Studies at the Rutherford Laboratory on the Problems of Superconducting Synchrotrons, I.
 111. W. S. G i l b e r t, R. B. M a u s e r, F. V o e l k e r, Losses in Pulsed Superconducting Magnets, I.
 112. В. П. А л е к с е е в и др., Испытания импульсных сверхпроводящих соленоидов, I.
 113. Р. А. В о д о п ь я н о в, В. В. Е л я н, В. И. Л и т в и н о в, Экспериментальный сверхпроводящий электромагнит с внутренним диаметром 600 мм, I.
 114. Н. И. Д о й н и к о в и др., О возможности применения для синхротронов сверхпроводящих электромагнитов со стационарным полем, I.
 115. Ф. А. В о д о п ь я н о в, В. В. Е л я н, Кольцевой сверхпроводящий ускоритель с постоянным магнитным полем, I.
 116. M. L. G o o d, The Fixed Field, Rotating-Magnet Synchrotron, or why Pulse?, Internal Rep., Dept. of Physics, State University of New York at Stony Brook, Stony Brook, New York, 1968.
 117. А. А. В а с и л ь е в и др., О возможности создания ускорителей и накопителей на сверхвысокие энергии с использованием сверхпроводящих магнитов, I.
 118. G. T. D a n b y, Synchrotrons Using High Field Iron Magnets Operating at Cryogenic Temperatures, I.
 119. H. H a h n, H. H a l a m a, Investigation of a Superconducting Niobium Cavity at S Band, I.
 120. L. S z e c s i et al., The Frequency Dependence of Superconducting Lead Layers at Low RF Power Level, I.
 121. W. K u h n et al., The Field Dependence Effects of Superconducting Lead Layers at High RF Power Level, I.
 122. F. H e l l e r et al., Experimental Investigation on Non-resonant Beam Break-up Effects, I.
 123. P. B e r n a r d et al., On the Choice of Deflecting Structures for Superconducting RF Separators, I.
 124. H. S c h o p p e r, The Optimization of Superconducting Particle Separators, I.
 125. C. P a s s o w, Development of Superconducting Proton Linear Accelerators, I.
 126. D. E. N a g l e, Linear Accelerator for Pions, I.
 127. G. B r o n c a et al., Closed Orbit Control for a Large Proton Synchrotron, I.
 128. Г. И. Б а ц к и х и др., Proc. of the 4th Intern. Conference on High-energy Accelerators, Dubna, 1963, Atomizdat, Moscow, 1964, стр. 217.
 129. А. А. В а с и л ь е в и др., Регулирование положения пучка частиц в ускорителе при помощи управляющей вычислительной машины, I.
 130. О. А. Г у с е в, С. Я. К о л е с о в, А. А. Т у н к и н, Цифровая система для автоматического управления синхротроном, I.
 131. Н. Г. А н и щ е н к о и др., Криогенная высокочастотная ускорительная секция кольцевого, I.
 132. J. R e e s, Remarks on Experimental Utility of Electron and Proton Accelerators, I.
-