

ПРЕПРИНТ

В.С.ПАНАСЮК



НОВЫЙ ТИП ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С СИЛЬНЫМ И СВЕРХСИЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ («Тролль-проект»)

НОВЫЙ ТИП ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С СИЛЬНЫМ И СВЕРХСИЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ («Тролль-проект»)

В.С. Панасюк

Федеральное Государственное унитарное предприятие «Всероссийский научноисследовательский институт оптико-физических измерений»

Содержание

Аннотация. Введение.	Стр. 2 2
Глава 1. Фундаментальные особенности синхронного ускорения	
заряженных частиц в циклических ускорителях с ведущим полем	
типа плазменной магнитной ловушки с торцевыми магнитными зеризлами	3
811 Синхронное прелускорение в синхротрон в елином электромаг-	5
ните велущего поля (экспериментальное исследование)	3
§1.2. Синхронное предускорение в бетатрон в едином электромагните	C
сверхсильного ведущего поля взрывомагнитных генераторов и	
встречные пучки нестабильных частиц (теоретическое исследование).	9
§1.3. Возможность вариации радиуса релятивистской орбиты пучка,	
включая многооборотный выпуск, и параметрические резонансы	
(экспериментальное исследование).	11
Глава 2. Небольшой проектировавшийся метрологический и научно-исследовательский центр Института на основе некоторых ускорителей электронов из «Тролль-проекта».	13
Глава 3. Варианты схем циклического ускорения электронов	16
на основании положении главы 1.	10
§5.1. Источники заряженных частиц для циклических ускорителей	16
с сильным и сверхсильным магнитным полем. 83.2. Перезаурат пушка на крайний раниус и ретреница электрон	10
уз.2. Перезахват пучка на краинии радиус и встречные электрон-	17
83.3. Ограничение радиуса синуропные пунки.	17
велушего поля инжекция электронов в кольшевой электромагнит и ускорение	
электронов в классическом шикпотроне	20
834 Схема конструкции промышленного синхротрона с многооборотным	20
азимутально-однородным выпуском без потерь частиц.	22
§3.5. О схеме конструкции промышленного генератора жесткого	
тормозного рентгеновского излучения для дефектоскопии.	24
§3.6. Формирование электронных колец в гофрированном ведущем	
поле. Некоторые схемы инжекции и малооборотный выпуск пучка.	24
§3.7. Совмещение оптических и ускоряющих резонаторов для лазера	
на свободных электронах. Когерентное излучение электронного	
сгустка.	26

§3.8. Возможность формирования двух независимых релятивистских	
пучков в одном синхротроне.	28
§3.9. Вывод синхротронного излучения с полной орбиты пучка и о	
возможности его нестандартного применения.	28
Заключение	30
Благодарности	31
Литература	32

Аннотация

В обзоре рассматриваются циклические ускорители заряженных частиц с сильным и сверхсильным ведущим магнитным полем. Ускорители разработаны на основе синтеза фрагментов трех классических направлений экспериментальной физики: ускорители заряженных частиц, сильные и сверхсильные магнитные поля и физика плазмы.

Простота устройства и малая стоимость новых ускорителей, а также легкость изменения параметров пучков и конструкций явились стимулом для обсуждения различных предложений по их применению как в некоторых областях, занятых классическими ускорителями, так и в новых схемах ускорения заряженных частиц.

Введение.

Была поставлена задача создания простых и малогабаритных циклических ускорителей со средними значениями энергии электронов и достаточно интенсивным пучком заряженных частиц.

Естественно было обратиться к уже значительно разработанным областям физики и, в том числе, физике и технике сильных магнитных полей, но для использования их в качестве ведущих. Электромагнит сильного магнитного поля подвергался простейшей переделке для получения магнитной фокусировки. Производилось расщепление обмотки, при которой автоматически образовывалась конфигурация магнитного поля, аналогичная плазменной ловушке с магнитными зеркалами [1].

Опыты по циклическому ускорению электронов велись в режиме синхронного ускорения при синхронном предускорении электронов из источника, расположенного по оси электромагнита, с использованием оригинального сочетания режимов. Опыты показали, что в миниатюрном синхротроне можно получить пучок релятивистских частиц с интенсивностью того же порядка, что и в больших классических машинах [2].

Успешные эксперименты вызвали интерес к возможности применения сверхсильных магнитных полей, получаемых от взрывомагнитных генераторов [3], в качестве ведущих для ускорения ионов. Эта работа, выполненная на уровне теоретического исследования, закончилась разработкой схемы ускорения тяжелых заряженных частиц в бетатроне, с конфигурацией магнитного поля, аналогичной плазменной ловушке с магнитными зеркалами, но образованной в сжимающейся взрывом проводящей оболочке (лайнере). Здесь предложено еще одно оригинальное сочетание режимов: синхронное предускорение в бетатрон [4]. Начальное магнитное поле при этом образуется от ведущего поля синхронного ускорения, с синхронным предускорением от источника ионов, расположенного по оси симметрии магнитного поля.

И, наконец, жизнеспособность нового направления была подтверждена уникальным экспериментом с многооборотным, азимутально-однородным выпуском пучка электронов без потерь частиц. Тематика, имеющая отношение не только к метрологии, но и к широкому кругу других задач [5]. Развитие техники сверхпроводящих электромагнитов позволило начать опыты по созданию, на основе новых ускорителей, синхронных режимов ускорения электронов в устройствах для получения долгоживущих пучков (держателей пучка) [2].

Последнее обстоятельство навело на мысль о реализации на указанном выше принципе встречных пучков заряженных частиц. Первое принципиальное предложение на эту тему было сделано еще в 1972 г. в работе [4]. Помимо предложений по применению ускорителей из «Тролль-проекта», в частности, со сверхсильным магнитным полем, получаемым с помощью взрыва, в работе [4] рассматривается схема встречных пучков нестабильных частиц мюонов и π -мезонов. Не вдаваясь в детали рассмотрения этой схемы (хотя и безусловно интересной, но пока еще в значительной мере экзотической), заметим, что тематику встречных пучков на основе представленных в этом обзоре ускорителей, по крайней, мере полезно обсудить. Это отнесено к специальному разделу в обзоре - схемам ускорения различного рода. Естественно здесь отсутствуют конструктивная разработка и технико-экономическое обоснование. Также сознательно не представлена теоретическая часть цитируемых экспериментальных работ. Это качественно увеличило бы объем текста без существенного поддерживания его достоверности. В необходимых случаях отсутствие теоретических положений иллюстрируется экспериментальными результатами в виде графиков. Традиционные вопросы, такие как возбуждение всех видов полей, вакуумная техника, радиационная защита и т.п., по понятным причинам также не обсуждаются.

Вообще же мы хотели удовлетворить возможное любопытство читателя главным образов рассмотрением принципиальных положений.

Так образовалось новое направление в технике ускорения заряженных частиц, основанное на синтезе фрагментов классических направлений экспериментальной физики: физика и техника ускорителей заряженных частиц, физика и техника сильных и сверхсильных магнитных полей и физика плазмы.

Глава 1. Фундаментальные особенности синхронного ускорения заряженных частиц в циклических ускорителях с ведущим полем типа плазменной магнитной ловушки с торцевыми магнитными зеркалами.

§1.1. Синхронное предускорение в синхротрон в едином электромагните ведущего поля (экспериментальное исследование).

Рассмотрим особенности ускорения заряженных частиц от тепловых скоростей до релятивистских энергий с постоянной частотой обращения по спиральной орбите, как в циклотроне, но, в отличие от него, в возрастающем во времени магнитном поле [2]. Ускорение в этом случае осуществляется частично высокочастотным, частично вихревым полями. По мере увеличения радиуса орбиты прирост скорости частиц уменьшается и при скорости, близкой к скорости света, рост радиуса траектории практически прекращается. Далее ускорение идет на орбите постоянного радиуса как в классическом синхротроне.

На рис. 1.1. изображены сепаратрисы при захвате частиц в ускорение для резонансного закона нарастания ведущего магнитного поля, характеризующегося постоянством равновесной фазы [2]. Начиная с момента времени t_0 , появляется область устойчивого ускорения. В интервале времени ($t_2 - t_0$), являющемся временем захвата частиц, область устойчивого ускорения захватывает уровень нулевой энергии E_0 , где $E_0 -$ энергия покоя частицы. С ростом магнитного поля равновесная энергия частицы растет, и в момент времени t_2 область устойчивого ускорения отходит от уровня E_0 . В приближении однородности ведущего и ускоряющего полей прирост энергии от высокочастотного поля $W_{вч}$ и вихревого поля W_{6et} определяется соотношением [2]:

$$\frac{W_{\text{бет}}}{W_{\text{BY}}} = \frac{(B/B_0)^2 - 1}{(B/B_0)^2 + 1},$$

где В – индукция ведущего магнитного поля, Во – поле циклотронного резонанса. В релятивистском случае В >> В_о приросты энергии одинаковы.

На рис. 1.2 изображены размеры области захвата и размеры пучка (внутренние кружочки) для различных безразмерных коэффициентов n и æ, определяющих конфигурацию магнитного поля по радиусу и оси, соответственно, ускорителя «Тролль–1» (рис. 2) и Лоренц – фактора $\gamma = 9$ [2]. Размеры пучка, полученные фотографированием синхротронного излучения, хорошо совпадают с рассчитанными по соответствующим формулам.

На интенсивность пучка оказывают влияние кулоновские силы в момент захвата электронов в ускорение. Предельная интенсивность пучка определяется срывом устойчивости синхротронных колебаний из-за азимутального компонента электрического поля заряда пучка. На рис. 1.3 показаны зависимости предельной интенсивности пучка от амплитуды высокочастотного поля, когда магнитное поле нарастает по резонансному закону [2]. С другой стороны, необходимую амплитуду высокочастотного поля можно обеспечить в области захвата при концентрации плазмы ниже критической [2]. При этом учитывалось, что плазма находится в условиях циклотронного резонанса и необходимо принимать во внимание релятивистские эффекты.

Весьма эффективным способом повышения эффективности пучка может быть относительно простая мера – задержка магнитного ведущего поля на уровне циклотронного резонанса. Типичная конечная энергия электронов в этом режиме составляет сотни киловольт. Так происходит формирование своеобразного виртуального катода с компенсацией пространственного заряда за счет ионов, образованных от ионизации остатков газа ускоренными электронами.

Хотя рассматриваемые ускорители имеют источник частиц тепловых скоростей, инжекция в режим ускорения в классическом понимании является высоковольтной. Действительно, начиная свое движение в центральной области электромагнита вблизи плазменного источника или термокатода с тепловыми скоростями, частицы будут ускоряться в циклотронном режиме. При большом наборе энергии за оборот длительность этого режима мала и изменением магнитного поля во времени можно пренебречь. В синхронный режим ускорения частицы захватываются задолго до формирования релятивистской орбиты, двигаясь разрозненно по орбитам, расположенным в зоне захвата. Типичные размеры этой зоны, включая размер по оси, составляют приблизительно половину радиуса релятивистской орбиты. Формирование сгустка начинается вблизи релятивистской орбиты, когда энергия частиц достигает сотен киловольт. Эта энергия в классическом понимании и является энергией инжекции. Благодаря этому механизму инжекции новые синхротроны являются сильноточными. Например, миниатюрный действующий ускоритель «Тролль-1» (см. ниже) имеет ~ 10¹⁰ частиц в пучке. При увеличении ускоряющего поля на величину более 10 кВ/см интенсивность пучка может быть доведена до ~ 10¹¹ частиц. Для сверхминиатюрного синхротрона с длиной волны ускоряющего поля равной 3 см (радиус релятивистской орбиты около 0.5 см), расчетная интенсивность пучка при той же напряженности поля составит ~ 10¹⁰ частиц. Во всех примерах показатель спада магнитного поля на релятивистской орбите n ≈ 0.2 [2].

Рассмотрим схему конструкции синхротрона «Тролль-1» (см. рис. 2). Полость одновиткового электромагнита с вырезом по медианной плоскости для образования магнитной фокусировки является одновременно и резонатором ускоряющего поля стоячей волны H_m. Для завершения полости объемного резонатора на торцах электромагнита необходимы диэлектрические отражатели высокочастотного поля С большой электрической постоянной и малым углом потерь. При этом автоматически достигается прозрачность для импульсного ведущего поля. Резонатор имеет очевидные достоинства: высокое шунтовое сопротивление и высокую электрическую прочность. Более того, в нем можно повысить при прочих равных условиях эквивалентную напряженность ускоряющегося поля в $\sqrt{2}$ раз, введя в стоячую волну круговую поляризацию, что



реализуется сравнительно просто особым способом возбуждения резонатора [6]. Однако, и большой недостаток: радиус конечной орбиты находится на половине радиуса







Рис. 1. Графики изменения параметров пучка в цикле ускорения:

1 CM

1.1. - сепаратрисы при захвате частиц в ускорение;
1.2. – размеры области захвата (вертикальная и горизонтальная оси соответственно)
при ξ₀ = 4 кВ/см. Внутренние кружки – размеры пучка при γ = 9;

1.3. – зависимость предельной интенсивности пучка от напряженности ускоряющего поля с учетом пространственного заряда частиц для резонансного нарастания ведущего поля.

Рис. 1.3.

резонатора, то – есть, в общем случае, радиуса электромагнита ведущего поля.

Предельная энергия электронов оказывается всегда меньше возможной. Действительно, частота обращения электронов на релятивистской орбите радиуса г равна [4, 5]

$$f_r = c/2\pi r$$
,

где с – скорость света. Резонансная частота ускоряющегося резонатора $f_r\,$ радиуса R и длиной 1>> R равна

$$f_R = c/(3.4R)$$
.

Приравнивая по условиям синхронизма, получим: r ~ 0.54 R. Казалось бы, радиус релятивистской орбиты можно увеличить стандартным путем, понизив частоту резонатора введением в его полость небольшого количества высокодобротного диэлектрика. Однако, это таит опасность потерь электрической прочности и вырождения моды колебаний.

Вакуумная камера – стеклянная. В целях увеличения электрической прочности к ускоряющемуся полю полость электромагнита-резонатора следовало бы сделать и вакуумной камерой. Ясно, однако, насколько возрастут конструктивные трудности при реализации такого варианта. При малом времени ускорения и, следовательно, сравнительно низком вакууме в качестве источника частиц может быть применена плазменная пушка.

Фотография главных узлов синхротрона «Тролль-1» приведена на рис. 3. Полные параметры ускорителя даны в таблице в главе 2.



Рис. 2. Схематический чертеж синхротрона на основе одновиткового соленоида сильного ведущего магнитного поля, полость которого является также резонатором ускоряющего поля волны H_ш: 1 – одновитковый соленоид; 2 – диэлектрическое зеркало резонатора; 3 – стеклянная вакуумная камера с аппендиксом для вывода синхротронного излучения; 4 – источник электронов (плазменная пушка); 5 – огибающая пучка; — силовые линии ведущего поля; ----- силовые линии ускоряющего поля; SR – синхротронное излучение.



Рис. 3. Фотография главных узлов синхротрона на основе одновиткового соленоида ведущего магнитного поля: 1 – одновитковый соленоид – резонатор (две разведенные половинки); 2 – аппендикс стеклянной вакуумной камеры для вывода синхротронного излучения; 3 – токовыводы соленоида.

Рассмотрим далее еще один тип резонатора, полуволновой ТЕМ, имеющий принципиальное значение для новых ускорителей (см. рис. 4) [2]. Резонатор имеет полости самостоятельную перестройку, независимую от электромагнита, И. следовательно, ограничений на радиус релятивистской орбиты не вносит. Полуволновые, замкнутые с обеих сторон на корпус резонатора длинные линии, расположены вдоль оси ускорителя. Такой тип длинных линий принято называть «полосковыми». Здесь они имеют желобковую форму. Линии автоматически связаны между собой емкостной связью через зону ускорения – полная электродинамическая аналогия с резонансным контуром циклотрона. Очевидно, как и в случае дуантов в циклотроне, близость поверхностей длинных линий к стенке резонатора качественно снижает его электрическую прочность по сравнению с резонатором Н_ш [6]. Оба типа резонаторов имеют важнейшее свойство: сохранять моды колебаний при полном разрезе по медианой плоскости ведущего поля с размером по оси, достаточным для выпуска с полной орбиты как пучка, так и синхротронного излучения. Высокочастотные токи в этом сечении отсутствуют, а максимум высокочастотного поля создает здесь электрическую связь настолько сильную, что полуволновые длинные линии сохраняют ту же электродинамику, что и в отсутствии разреза.

Еще два типа резонаторов имеют значение в связи с возможностью перезахвата пучка. Поскольку в рассматриваемых ускорителях перемещение конечной орбиты пучка по радиусу, в силу их природы, трудностей не представляет (§1.3), в пристеночной области резонатора $H_{\rm m}$ могут быть расположены резонаторы: или четвертьволновый ТЕМ азимутальный или объемный E_{010} . При этом для введения пучка они должны содержать боковые вырезы. Так решается вопрос относительного полного использования радиуса

электромагнита – получения, при прочих равных условиях, максимальной энергии пучка. Здесь также возможно доускорение уже на высших гармонических от частоты обращения частиц, что важно в работах с временной структурой синхротронного излучения (глава 2).



Рис. 4. Схематический чертеж резонатора волны TEM, возбуждаемой электрически связанными полуволновыми короткозамкнутыми с обеих сторон желобковыми длинными линиями (с электродинамикой, сходной с ускоряющим резонатором циклотрона): 1 – корпус резонатора; 2 – желобковая полуволновая длинная линия, перестраиваемая изменением длины вдоль оси ускорителя; 3 – фидер с витком связи; 4 – огибающая пучка.

Заметим, что использование ведущего поля, вероятно, можно улучшить еще одним способом – негармоническим ускоряющим полем от суперпозиции двух рассмотренных выше типов Н_ш и ТЕМ полей [7]. При этом возможно формирование двух независимых пучков с разными радиусами релятивистских орбит в одном синхротроне (§3.8).

§1.2. Синхронное предускорение в бетатрон в едином электромагните сверхсильного ведущего поля взрывомагнитных генераторов и встречные пучки нестабильных частиц (теоретическое исследование).

Обсуждения по применению взрывомагнитных генераторов для ускорения заряженных частиц велись ранее на уровне энергетических соображений. В лучшем случае – в виде предложений по использованию одного из типов взрывомагнитных генераторов для питания специальных безжелезных ускорителей [3]. Здесь мы рассматриваем взрывомагнитный [3, 8] генератор на основе сжимающейся проводящей оболочки и покажем, что он автоматически является и бетатроном для ускорения заряженных частиц [4]. Примерный схематический чертеж взрывомагнитного бетатрона с синхронным предускорением частиц от тепловых скоростей показан на рис. 5. Габариты ускорителя должны соответствовать общим размерам разработанных такого взрывомагнитных генераторов, что составляет полость с резонансной длиной волны порядка 10 см. Для тяжелых частиц речь идет о мегагауссных магнитных полях даже на уровне циклотронного резонанса. Его, очевидно, будут проходить по очереди (захватываться в ускорение) ионы с различным отношением заряда к массе. Соответственно, на орбите частиц предельной скорости (при адекватном источнике) может оказаться пучок, смешанный из частиц разного сорта, кроме легких частиц, которые выбудут из ускорения благодаря синхротронному излучению. После синхронного ускорения начинается ускорение бетатронное – неизвестное в ускорительной технике сочетание режимов циклического ускорения заряженных частиц [4].



Рис. 5. Схематический чертеж возможной конструкции ускорителя тяжелых частиц взрывомагнитного бетатрона с синхротронным предускорением ионов: 1 – взрывчатое вещество; 2 – сжимающаяся проводящая оболочка (лайнер) и резонатор волны H_ш синхронного предускорения ионов до взрыва; 3 – диэлектрический отражатель ускоряющего поля, прозрачный для ведущего поля; 4 – электромагнит начального магнитного поля бетатрона и ведущего поля при синхронном предускорении; 5 – источник легких ядер или тяжелых ионов в объеме захвата частиц; 6 – промежуточное положение лайнера после начала взрыва.

В обычных бетатронах частицы ускоряются при постоянном радиусе орбиты. Индукционное ускорение при переменном радиусе орбиты требует слишком большой рабочей области магнитного поля по радиусу. Причем эта область используется не

эффективно, так как в конце ускорения пучок занимает ее малую часть. При получении же сверхсильных магнитных полей с помощью сжимающихся оболочек и использовании их для индукционного ускорения имеет место геометрическое подобие радиуса орбиты пучка и радиального размера оболочки. Действительно, из закона сохранения магнитного потока при сжатии цилиндрической или сферической оболочки радиусом R с магнитным полем индукции В следует, что [4]:

$$\frac{B_{H}}{B_{\kappa}} = \frac{R_{\kappa}^{2}}{R_{H}^{2}}$$

где индексы «н» и «к» относятся, соответственно к начальным и конечным значениям соответствующих величин. С другой стороны известно, что отношение квадрата поперечного импульса Р² к полю В равно:

$$\frac{\frac{P_{H}^{2}}{B_{H}} = \frac{P_{K}^{2}}{B_{K}} \approx inv,$$

и, учитывая, что импульс P ≈ Br, где r – радиус орбиты, имеем:

$$\frac{\frac{P}{K}}{\frac{P}{H}} = \frac{\frac{R}{H}}{\frac{R}{K}} = \frac{\frac{r}{H}}{\frac{r}{K}} = K,$$

где К – коэффициент сжатия.

Если пучок до начала сжатия подвести близко к стенке оболочки (лайнера), то радиальный размер магнитного поля оказывается близким радиусу орбиты в течение всего цикла ускорения. Иначе говоря, пучок «убегает» от сжимающейся стенки оболочки, а импульс частицы увеличивается пропорционально ее сжатию. Можно показать, что плотность пучка возрастает пропорционально К³, что в частности, важно для встречных пучков [4]. Спустя 20 лет после публикации [4] была опубликована работа [9], где авторы приходят к некоторым выводам, аналогичным нашим, при рассмотрении плазменных лайнеров. Заметим, что поле синхронного предускорения (которое автоматически является и начальным полем кумулятивного взрывного сжатия), естественно возбуждать также от взрывомагнитного генератора, но другого типа – линейного [8].

Интерес, проявленный в середине века к использованию сверхсильных магнитных полей для ускорения тяжелых заряженных частиц, не был случайным и был связан с использованием энергоемких источников возбуждения импульсного магнитного поля – взрывомагнитных генераторов. Естественно, этот способ имеет принципиальный недостаток – однократность действия. Однако, после эпохи разработки и испытания атомных (водородных) бомб техника сбора информации в однократном эксперименте была развита до весьма высокого уровня. К этому надо добавить другое эпохальное событие – появление космической техники, которое открывает новые области применения взрывомагнитных ускорителей тяжелых ионов, в частности, на планетах. Например, для оперативного радиационного анализа почвы. При этом отсутствие атмосферы облегчает реализацию ускорителя [10].

В работе [4], помимо схем применения взрывомагнитных генераторов для ускорения тяжелых ионов, обсуждаются схемы встречных пучков вторичных нестабильных частиц мюонов и π -мезонов с зарядами разных знаков. В §3.2 эта тема затрагивается вновь в связи с установками встречных пучков, описанных в работе [1].

§1.3. Возможность вариации радиуса релятивистской орбиты пучка, включая многооборотный выпуск и параметрические резонансы (экспериментальное исследование)

Выпуск пучка заряженных частиц на внешнюю мишень, как известно, в ускорительной технике имеет широчайшее распространение не только для научных экспериментов, но и технологий. Как правило, выпуск пучка характеризует особенности ведущего поля на релятивистской орбите. В данном случае – практически все поле сплошного электромагнита и в связи с этим возможности реализации тех или иных предлагаемых схем ускорения.

Исследования азимутально-однородного многооборотного выпуска пучка производились на установке, схема конструкции которой изображена на рис. 6, принципиально аналогичной установке на рис. 2. Важно, чтобы боковая стенка вакуумной камеры находилась в области неустойчивого движения электронов, так как только при этом углы между траекториями частиц и стенкой камеры достаточно велики [5].



Рис. 6. Схематический чертеж конструкции синхротрона в экспериментах по многооборотному выпуску пучка в область обратного потока ведущего поля (воздух): 1 – одновитковый соленоид – резонатор с зазором в медианной плоскости для выпуска пучка; 2 – кольцевой электрод для измерения заряда пучка; 3 – вакуумная камера; 4 – сечение пучка на орбите предельной скорости; 5 – источник электронов (плазменная пушка); 6 – диэлектрический отражатель с запредельным цилиндром; 7 – токовводы соленоида; 8 – огибающая пучка при его движении; 9 – изолятор измерительного электрода; 10 – вводы мощности ускоряющего поля.

При достижении частицами предельной энергии в некоторый момент времени ускоряющее высокочастотное поле отключается. Спад ведущего поля во времени происходит по закону, определяемому генератором возбуждения поля, и пучок движется к боковой стенке вакуумной камеры. Переход в неустойчивый режим движения для частиц с нулевыми амплитудами бетатронных колебаний происходит на радиусе, где коэффициент спада поля n(r) = 1, рис. 7(A). С увеличением п электроны быстрее достигают области неустойчивости и меньше теряют энергию из-за торможения вихревым полем и от синхротронного излучения. Например, для n = 0.5 на релятивистской орбите

потеря энергии составляет 35% от 4 МэВ. Из этого видно, что для уменьшения потерь энергии пучка при движении его к боковой стенке ускорительной камеры конечную (релятивистскую) орбиту пучка следует «располагать» возможно ближе к ней. Как уже говорилось (§1.1) для этого необходим резонатор полуволновый TEM, рассматриваемый также и в §3.4. Из формул [5], подтвержденных числовыми расчетами, для данного ведущего поля получено увеличение вертикального размера до момента срыва устойчивости в 1.1 раза. В процессе ускорения пучок проходит n=0.25, расположенный между областью захвата и релятивистской орбитой, а при выпуске n=0.75. Слабая реакция пучка на параметрические резонансы при циклическом ускорении тяжелых заряженных частиц в ведущем поле, имеющем конфигурацию плазменной ловушки, подтверждается и в теоретической работе [9]. Напомним, что это обстоятельство позволяет реализовать в «Тролль – проекте» различные схемы ускорения, помимо рассматриваемой здесь схемы уникального выпуска пучка.



Рис. 7. Параметры ведущего поля (рис. А) в эксперименте по определению углов выхода пучка в воздух в плоскости орбиты (рис. В):

A). B(r), n(r) – изменение индукции В и коэффициента спада n в медианной плоскости ускорителя; ρ - радиус орбиты электронов предельной скорости; 1 и 2 – стенка камеры и измерительный электрод, соответственно.

В). 1 – расчетная траектория выхода равновесной частицы; 2 – фотография тени на фотопленке от свинцовой пластинки; 3 – свинцовая пластинка; 4 – стенка камеры; 5 – поверхность измерительного электрода; 6 – орбита электронов предельной скорости (до начала выпуска); 7 – след выведенного пучка на фотопленке, обернутой вокруг ускорительной камеры.

Кольцевой измерительный электрод, на который попал пучок при выпуске, располагается в зоне действия обратного потока ведущего поля, чем подавлялись различные явления, связанные со вторичными частицами. Заряд пучка определяется по напряжению на известной емкости кольцевого электрода. В частности, еще раз были подтверждены графики на рис. 1.3 для частного случая параметров зоны захвата и

ускоряющего поля. Заряд выпущенного напряженности пучка соответствовал интенсивности 10⁹ частиц. Геометрические характеристики пучка определялись по плотности почернения экспонированной фотопленки. Осевое и азимутальное распределения частиц отображались на фотопленке, обернутой вокруг ускорительной камеры (см. рис. 7(В)). На радиусе боковой стенки камеры вертикальный размер не превышает 10 мм, что совпадает с расчетными формулами [5]. Распределение частиц по азимуту однородно. Углы выхода электронов из стенки камеры в воздух определены по границам тени, оставленной свинцовой пластинкой на фотопленке, расположенной в плоскости орбиты рис. 7(В). Со схемой орбит совмещен отпечаток с экспонированным углом. Сравнение расчетной траектории 1 и границы 2 указывают на хорошее совпадение эксперимента и теории [5].

Схема конструкции промышленного ускорителя с азимутально-однородным выпуском пучка для технологических целей рассмотрена в §3.4.

Глава 2. Небольшой проектировавшийся институтский метрологический и научноисследовательский центр на основе некоторых ускорителей из «Тролль-проекта»

«Государственный специальный эталон единицы спектральной плотности энергетической яркости оптического излучения в диапазоне длин волн 0.25 – 0.04 мкм» основан на синхротроне «Тролль–1». Параметры ускорителя приведены в таблице. Метрологическая часть эталона представлена монохроматором по схеме Питца [11].

Рассмотрим особенности синхротронного излучения в связи с параметрами синхротрона, в значительной степени типичными для ускорителей «Тролль–проекта».

При малом времени ускорения и времени удержания пучка воздействие синхротронного излучения на параметры сгустка не успевает придти в «равновесное состояние» с его размерами и оптическими характеристиками. Имеет место «большой сгусток». Как показано в работе [12] это обстоятельство не является порочащим для его применения в метрологии. Специфические спектральные и поляризационные характеристики сгустка рассчитываются с высокой точностью [13, 14].

Малый радиус орбиты (большая частота обращения электрона) при прочих равных условиях позволяем получить большую мощность излучения на электрон. Это облегчает реализацию методики измерения заряда пучка по счету электронов [15]. Надо добавить, что для заданной критической длины волны в синхротронном излучении его интенсивность пропорциональна величине индукции ведущего магнитного поля [13, 14].

Малый радиус орбиты позволяет получить во временной характеристике синхротронного излучения импульсы в наносекундном диапазоне длительностей, что используется для градуировки электронно-оптических преобразователей [16]. Перезахват пучка на ускорение на высших гармонических составляющих от частоты вращения, например, в резонаторе типа E_{010} (§3.2), позволит приблизиться к фемтосекундному диапазону длительности. Здесь эти возможности в значительной мере уникальны – как для исследований характеристик фотокатодов, так и для проверки линейности размеров.

Существенным недостатком синхротрона «Тролль–1» является необходимость непосредственного контакта электромагнита ведущего поля с устройством его возбуждения – конденсаторной батареей. Это делает установку громоздкой в целом, требует к тому же экранирования от излучаемых помех, связанных с коммутаторами тока. Таким недостатком не обладает синхротрон «Тролль–2» (см. таблицу), работающий на основе многовиткового электромагнита. Здесь конденсаторная батарея и коммутаторы тока вынесены в другое помещение, благодаря чему весь синхротрон с его вспомогательными узлами превращается в настольную установку (см. рис. 8) [17]. Более того, благодаря сравнительно длительному импульсу синхронного излучения, качественно сказывается его влияние на размер сгустка. Заметим, что работы по теме

«Тролль–2» велись на основе установки сильного магнитного поля, разработанной в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова в Москве.

Таблица параметров источников синхротронного излучения, созданных на основе «Тролль-проекта» для метрологического и научно-исследовательского центра института.

Параметр	«Тролль–1»	«Тролль–2»	«Тролль–2С»*
Критическая длина волны синхротронного излучения, нм	73	6.2	200
Мощность излучения на электрон, 10 ⁻⁷ ×Вт	0.15	2.7	2.3×10 ⁻²
Количество ускоренных частиц	10 ¹⁰	10 ⁸	10 ⁹
Энергия электронов, МэВ	50	135	48
Индукция ведущего магнитного поля, Т	10	15	4
Радиус орбиты предельной скорости, см	1.7	3	4
Длина волны ускоряющего напряжения, см	11	19	25
Длительность импульса излучения при постоянной энергии электронов, с	10 ⁻⁶	10-3	Непрерывный режим
Длительность цикла ускорения, с	5×10 ⁻⁶	5×10 ⁻³	60
Частота циклов ускорения, мин ⁻¹	0.5	0.3	-

<u>Примечание.</u> Количество частиц в пучке держателя «Тролль-2С» приведено на основании эксперимента на макетирующей установке.



Рис. 8. Фотография синхротрона на основе многовиткового соленоида ведущего магнитного поля «Тролль – 2»: 1 – расщепленный на две половины электрогмагнит; 2 – прокладка между половинами обмотки с каналами для вывода синхротронного излучения; 3 – тракт возбуждения ускоряющего поля.

Для перевода Государственного эталона из разряда специального в разряд абсолютного (измерение интенсивности пучка по счету электронов), предполагалось ввести квази непрерывный режим излучения, реализуемый ускорителем на основе сверхпроводящего электромагнита и с длительным временем жизни пучка – «Тролль–2С». С этой целью был Донецким физико-техническим институтом разработан сверхпроводящий электромагнит с соленоидной обмоткой [18]. Криостат электромагнита сконструирован с учетом необходимости получения сверхвысокого вакуума в ускорительной камере. Теплое отверстие соленоида (ускорительная камера) отделяется от стенки криостата двумя полостями. В первой, прилегающей к его стенке, циркулирует вода для отбора тепла, которое излучается ускорительной камерой, нагреваемой для обезгаживания до 300°C. Вторая полость, вакуумная, является термоизолирующей. Для вывода синхротронного излучения предусмотрены четыре канала (на радиусах 16, 35, 40 и 45 мм), проходящих через систему полостей криостата. Индукция магнитного поля равна ~ 4 Т. воспользоваться достижениями в разработке сверхпроводящих Если удастся электромагнитов с индукцией поля 10 Т [19], то энергия держателя пучка может быть соответственно повышена приблизительно до 120 МэВ. Общий вид сверхпроводящего электромагнита показан на рис. 9. Справа – установка с теплым электромагнитом и конфигурацией поля, аналогичной сверхпроводящему магниту. На ней, в частности, отрабатывался термокатод с электрической потенциальной ямой (§3.1). Некоторые параметры держателя пучка типа «Тролль–2С» показаны в вышеприведенной таблице.



Рис. 9. Фотография сверхпроводящего электромагнита ведушего поля держателя пучка (А) и экспериментальной установки (В):

А). 1 – фланец одного из каналов для вывода синхротронного излучения; 2 – криостат сверхпроводящего электромагнита с прогреваемой камерой сверхвысокого вакуума; 3 – тракт возбуждения ускоряющего поля.

В). 4 – вакуумная камера экспериментальной установки; 5 – теплый электромагнит экспериментальной установки.

Для непосредственного измерения пучка в метрологии имеет принципиальное значение выпуск его на открытый зонд без потерь частиц (воздух). Действительно, измерение заряда путем сброса пучка на внутренний зонд связано с большими ошибками из-за попадания на него «вакуумных» ионов. Применение экрана приводит к «увязанию» в нем электронов пучка [5]. Поэтому в перспективе разработок предполагались опыты по измерению электрических величин на основе исследований по выпуску пучка. Результаты этих исследований изложенны в §1.3. Пучок с зарядом, измеренным по счету электронов, без потерь, выпускается на электрод, емкость которого известна с большой точностью. Тогда потенциал на электроде от заряда выпущенного пучка явится эталоном напряжения. Эталон тока на основе накопителя электронов описан в работе [20].

Глава 3. Варианты схем циклического ускорения электронов на базе положения главы 1.

§3.1. Источники заряженных частиц для циклических ускорителей с сильным и сверхсильным магнитным полем.

Некоторые схемы ускорения заряженных частиц изложены в работе [21]. Рассмотрим кратко источники заряженных частиц для приведенных здесь схем ускорения.

При быстром ускорении (порядка миллисекунд) и при однократных импульсах, когда значение вакуума практически не связано с работой источника, применяется простейшая плазменная пушка (пушка Маршалла). Пушка размещается на оси потенциальной ямы магнитной ловушка за пределами зоны захвата частиц в ускорение.

Если имеет место большая частота циклов ускорения или необходимость поддержания сверхвысокого вакуума при однократных импульсах, нужно применять источник частиц с термокатодом типа Пенинга (например, рис. 13, 14).

Разработка источника проводилась на установке, показанной на рис. 9В (см. главу 2) и состояла в следующем. Типичная зона захвата представляет собой цилиндр приблизительно одинаковой высоты и диаметра, равных половине диаметра орбиты электронов предельной скорости резонатора. Поэтому диаметр термокатода должен соответствовать этой величине. Однако, для упрощения конструкции термокатод был изготовлен из вольфрамовой нити накаливания низковольтной осветительной лампочки мощностью 40 Вт. Чтобы уменьшить разрушающее действие магнитного поля, термокатод запитывался от постоянного тока. Напряжение на закороченных катодантикатоде относительно корпуса резонатора (электрическая потенциальная яма) составло величину более 1 кВ и создавалось генератором напряжения частоты 20 - 50 кГц. Исследование источника проводилось при циклотронном значении индукции магнитного поля. Интенсивность тока ускоренных частиц наблюдалась по амплитуде и плотности тормозного ү – излучения от соударения ускоренных электронов с молекулами остаточного газа. Характерно, что переход на питание системы катод – антикатод постоянным напряжением приводил к снижению интенсивности ускоренных частиц в 3-4 раза. Основное влияние на вид осциллограммы тормозного излучения от ускоренных частиц оказывала величина катодного (антикатодного) тока. При малых его значениях, порядка единиц миллиампер, в тормозном излучении появлялась полная модуляция частотой питания источника; при увеличении тока на порядок она исчезала. При этом изменения амплитуды тормозного излучения не наблюдалось. Не наблюдалось и заметных различий, связанных со способами регулирования тока - изменением накала термокатода или напряжения питания потенциальной ямы. Дальнейшее увеличение тока не увеличивало интенсивность у – излучения. Это явление не зависело от частоты напряжения генератора, питающего систему катод – антикатод, в указанном выше диапазоне частот.

Разработка источника электронов с термокатодом была выполнена при финансовой поддержке фонда А.М. Прохорова.

Принципиальное положение, которое вводит рассматриваемые ускорители в область исследований на высоких энергиях, помимо встречных электрон – электронных пучков (§3.2), является создание источника позитронов с малыми скоростями, соответствующими их величине в зоне захвата. При этом установка встречных электрон – позитронных пучков оказывается уникально простой из-за отсутствия устройств выпуска, впуска пучка и его транспортировки [2]. Это может оказаться стимулом для выполнения столь сложных исследований.

В качестве источника тяжелых частиц для ускорителей со сверхсильным магнитным полем, основанных на взрывомагнитных генераторах, может применяться источник того же типа, что и в классических циклотронах.

§3.2. Перезахват пучка на крайний радиус и встречные электрон - электронные и электрон - позитронные пучки.

Рассмотрим устройство типа классической установки постоянного сильного магнитного поля (теплый электромагнит) в качестве источника релятивистских электронов, синхротронного излучения и основы для встречных электрон – позитронных пучков.

Поскольку получение постоянного магнитного поля теплого электромагнита связано со значительными материальными затратами [8, 22] вопрос о полном использовании его радиуса является основным. Поэтому перезахвату пучка в резонатор, который расположен на крайнем радиусе, уделим здесь основное внимание.

Ускоритель подключается к системе возбуждения поля через дополнительное устройство, чтобы реализовать режим быстрого ускорения пучка и его перезахвата (см. рис. 10). В основу перезахвата пучка должен быть положен режим, при котором время



Рис. 10. Схема устройства управления ведущим и ускоряющим полями и графики изменений полей во времени при перезахвате пучка из резонатора волны H_ш в резонаторы

других типов и разного назначения (А). Схематический чертеж возможной конструкции блока таких резонаторов (В).

А). J – источник питания электромагнита L_1 постоянного сильного магнитного поля; U – источник заряда батареи конденсаторов C_1 , предназначенных для быстрого предускорения частиц; L_2 – индуктивность, защиты источника питания от токов при быстром предускорении частиц; C_2 – блокировочная емкость защиты источника питания от токов при быстром предускорении частиц; K_1 и K_2 – коммутирующие ключи; B_0 – индукция поля циклотронного резонанса; B_1 – начальная индукция поля; B_2 – индукция поля, соответствующая положению пучка для перезахвата в другие резонаторы; ε_0 – зависимость ускоряющего напряжения от времени на резонаторах; $I_{ист}$ – огибающая тока тепловых электронов источника.

В). 1 – управляющий полуволновой резонатор волны ТЕМ с вырезом для ввода пучка; 2 – огибающая пучка; 3 – резонатор Н_ш; 4 – резонатор Е₀₁₀ с вырезом для ввода пучка.

существования свободного, не захваченного ускоряющим полем пучка, должно быть сокращено до минимума. Потери энергии от синхронного излучения и от тормозящего вихревого поля в таком режиме должны быть ограничены величиной, при которой оставшаяся энергия пучка достаточна для сохранения релятивистской орбиты. Из этих соображений устройством питания электромагнита Ј устанавливают начальную величину индукции магнитного поля В₁, соответствующую начальной энергии пучка. Ключом К₁ ускоритель подключается к предварительно заряженной батарее конденсаторов С1 для импульсного снижения поля до величины В₀ – циклотронный резонанс. Допустимая длительность импульса – десятки миллисекунд. После окончания цикла предускорения при индукции В₁ пучок становится долгоживущим для операции перезахвата: снижения поля до величины В₂, соответствующего релятивистской орбите, проходящей через резонатор E₀₁₀. Далее ключ К₂ замыкается и поле поднимается устройством возбуждения до предельной величины. Электромагнитное ускоряющее поле (см. график) может возбуждаться от любого типа генераторов, включая и режим самовозбуждения на резонансном контуре [23]. Напомним, что половину мощности при ускорении релятивистский пучок получает от вихревого поля [2]. Источником частиц должен быть термокатод, соединенный электрически с антикатодом и образующий электрическую потенциальную яму типа описанного в §3.1.

Принципиальным для получения долгоживущего пучка является ускорение в сверхвысоком вакууме, что в малом объеме реализуется элементарно.

С возможным радиусом орбиты 5 см и индукцией поля 20 Т энергия электронов составит 300 МэВ. При ускоряющем поле (10-15) кВ/см, величине далеко не предельной, легко получить интенсивность пучка 10¹¹ частиц [2].

Кратко рассмотрим схемы компоновки установок встречных пучков, описанных в работе [1], и их изменение при выполнении на принципах «Тролль – проекта.

Установка встречных электрон-электронных пучков ВЭП-1 состояла из накопителя в виде двух соприкасающихся электромагнитов с железным сердечником, внешнего инжектора, устройств выпуска и впуска пучка и его транспортировки. Полезно заметить, что ускоритель – инжектор был основан на «безжелезном» электромагните с сильным ведущим магнитным полем, и, по этому признаку, родственен ускорителям из «Тролль-проекта». Этот комплекс устройств мог бы выглядеть проще в случае применения двух соприкасающихся держателей пучка типа «Тролль» - синхротронов с синхронным предускорением электронов.

До примитивности просто выглядела бы установка встречных электрон – позитронных пучков ВЭПП–2 при адекватном по простоте источнике позитронов малых энергий (§3.1). Однако, даже в классическом (высоковольтном) способе получения позитронов, реализованном в установке ВЭПП-2, можно получить упрощение комплекса, используя синхротрон типа «Тролль». Вообще же, описанные схемы встречных пучков

могут быть реализованы на основе «Тролль-проекта» в разных вариантах как на сильных, так и классических ведущих магнитных полях.

Приведем копии двух рисунков из работы [1] с изображением блок-схем установок ВЭП–1 (рис. 11) и ВЭПП–2 (рис. 12). Стрелками указаны узлы, которые останутся в блоксхемах при возможной реализации этих установок на принципах «Тролль–проекта».



Рис. 11. Схема расположения элементов установки ВЭП-1: 1 – компенсирующие системы; 2 – магниты накопительных дорожек; 3 – резонатор; 4 – инфлектор; 5 – высоковакуумный насос; 6 – межфланцевое пространство; 7 – квадрупольные линзы; 8 – коммутирующий магнит; 9 – корректирующая катушка; 10 – поворотный магнит; 11 радиационный и магнитный экран; 12 – корректирующие магниты; 13 – синхротрон Б-2С.



Рис. 12. Общая схема установки ВЭПП-2: 1 – амплитудный ускоритель; 2 – корректирующие линзы; 3 – цилиндрические линзы; 4 – синхротрон Б-3М; 5 – квадрупольные линзы; 6 – поворотный магнит; 7 – накопительная дорожка; 8 – параболические линзы; 9 – конвертер; 10 – система параллельного переноса пучка.

Ограничение на радиус электромагнита синхротрона при синхронном предускорении рассмотрено в (§3.3). Оно прямо относится и к установкам встречных пучков.

§3.3. Ограничение радиуса синхротрона со сплошным электромагнитом ведущего поля, инжекция электронов в кольцевой электромагнит и ускорение электронов в классическом циклотроне.

Рассмотрим сочетание электромагнитов ведущего поля, один из которых, сплошной, формирует поле плазменной ловушки ферромагнитными полюсами с обратным потоком, замыкающимся через железный магнитопровод, другой – кольцевой, с магнитным потоком, развязанным от первого. На рис. 13 изображены схема конструкции установки, в которой синхронное предускорение в синхротрон происходит не в едином, но разных электромагнитах – в какой-то мере классический вариант. Из рисунка видно, что радиус кольцевого электромагнита определяется границей поля сплошного



Рис. 13. Схематическое сечение установки (одна из симметричных половин) для формирования ведущего поля типа ловушки в междуполюсном пространстве электромагнита с ферромагнитным сердечником для синхротрона со сплошным полюсом электромагнита и инжекции из него электронов в синхротрон на основе кольцевого электромагнита: 1 – обмотка сплошного электромагнита; 2 - обмотка сверхпроводящего кольцевого электромагнита (криостат не показан); 3 – канал для однооборотного выпуска частиц; 4 – единый блок, состоящий из резонатора Н_ш в полости металлической вакуумной камеры с разрезом вдоль образующей и металлокерамическим вакуумным швом (на чертеже не показан); 5 - магнитопровод обратного потока из тонко шихтованного железа; 6 – ферритовый полюс; 7 – антикатод источника электронов; 8 – резонатор Е₀₁₀ или ТЕМ (четвертьволновый0; 9 – дефлектор однооборотного выпуска частиц; 10 – огибающая пучка; 11 – термокатод источника электронов.

электромагнита. Рассмотрим ограничения на радиус сплошного электромагнита. Если принять тип ускоряющегося резонатора $H_{\mu\nu}$ и вспомнить, что радиус релятивистской орбиты в нем $r_0 = 0.54R_0$, где R_0 – радиус резонатора, то формула будет иметь вид:

$$R_0 \approx 1.9 \frac{Cm_0}{B_0 e}.$$

Если принять $B_o \sim 2.5 \times 10^{-3}$ T, то $R_o \sim 1.2$ м. при индукции поля кольцевого электромагнита, например, 4 T, то энергия электронов составит 1.4 ГэВ. Не рискуя сравнивать данное экзотическое предложение с действующей машиной «Аврора» [27], похожей на рассматриваемую схему только габаритами и применением сверхпроводящего кольцевого электромагнита, заметим, что энергия электронов в ней составляет 0.7 ГэВ [24]. Говорить об использовании магнитного поля в схеме конструкции кольцевого электромагнита в данном случае не имеет смысла.

Железный сердечник сплошного электромагнита в целях быстродействия должен быть тонко шихтован или выполнен из феррита. Грубые оценки показывают, что индуктивность его обмоток достигает приблизительно 1 Г. Это значит, что при умеренном напряжении на обмотках необходимая энергия электронов в единицы МэВ достигается за время приблизительно 1 мс.

Понимая условность такой операции, сделаем оценку интенсивности пучка в ускорителе путем сопоставления с параметрами синхротрона «Тролль–1» (см. таблицу в гл. 2). Поскольку объем камеры ускорителя «Тролль–1» составляет около 100 см³ при интенсивности пучка 10^{10} частиц, то при объеме камеры в 1 м³ следует ожидать интенсивности пучка в 10^4 раз большей, т.е. 10^{14} частиц. В методе коллективного ускорения ионов [25] интенсивность пучка составляет 10^{13} электронов в кольце диаметром порядка 10 см и площади поперечного сечения порядка единиц см², т.е. плотность тока много более рассматриваемого случая. Это дает основание полагать, что возникновение губительных неустойчивостей в пучке мало вероятно и, таким образом, рассматриваемый ускоритель можно считать сильноточным.

При большей интенсивности время жизни пучка мало [24], и тогда может быть целесообразно использовать его для инжекции в другие установки. Если же понадобится систематическое повторение циклов ускорения, то пучок, оставшийся от предыдущего цикла, в целях уменьшения радиационных излучений следует тормозить снижением индукции ведущего поля до нуля, с помощью вихревого и высокоточного полей.

Ввиду сравнительно больших габаритов ускорителя возбуждение ускоряющих полей технически проще вести в режимах самовозбуждения при силовой емкостной связи резонансных контуров с генераторными лампами [23]. Здесь рационально использование источника частиц с термокатодом, который рассматривается в §3.1.

Наконец, нельзя не вспомнить того обстоятельства, что для реализации предварительных экспериментов по рассмотренной здесь схеме, мы получили в дар от академии Г.Н. Флерова из Объединенного института ядерных исследований в Дубне большой электромагнит с железным сердечником. Его начальные параметры позволяли произвести переоборудование в соответствии и требованиями описанного эксперимента.

На этом же электромагните предполагалось смоделировать синхронное ускорение электронов на классическом циклотроне [2]. Источник частиц был выполнен в виде нитяного термокатода, а ускоряющийся резонатор – в виде однодуантного резонансного контура, входящего в автогенератор [23]. Следует заметить, что рассмотренные выше ограничения на диаметр сплошного электромагнита в циклотроне ощущаются гораздо острее. Это связано с влиянием остаточного намагничения полюсов, а также различных неоднородностей по их площади при малом начальном поле. К тому же отсутствие шихтовки магнитопровода не позволяет вести быстро синхронное ускорение, что связано с потерей частиц при стандартном циклотронном вакууме. Указанные обстоятельства технического характера (резонансный контур, источник частиц и вакуум) требуют принятия соответствующих мер уже на этапе проектирования циклотрона. Надо иметь в виду, что на классическом циклотроне с диаметром полюса среднего размера при синхронном ускорении достижимая энергия электронов составляет величины порядка сотен МэВ.

В циклотроне с пространственной вариацией поля в принципе может быть реализована глубина модуляции, достаточная для попадания релятивистских электронов на орбиту крайнего радиуса без изменения индукции поля во времени. И хотя синхротронное излучение при этом невелико, возможен режим накопления частиц на крайнем радиусе – образование подобия виртуального катода уже для синхронного доускорения до предельной энергии [21].

§3.4. Схема конструкции промышленного синхротрона с многооборотным азимутально - однородным выпуском пучка без потерь частиц.

Как известно, в ускорителях прямого действия, а также в линейных ускорителях, выпущенный пучок, который используется в технологических линиях для облучения различных объектов, как правило, подвергается сканированию. В рассматриваемом случае пучок автоматически сканирован в силу природы выпуска, но в особой геометрии, что требует адекватных приемов при его использовании. Рассматривать их следует для каждого случая отдельно. Выше (см. §1.3, рис. 6) обсуждалась лабораторная установка для опытов с выпуском пучка. Здесь же рассмотрим принцип возможного устройства ее промышленной конструкции (см. рис. 14).



Рис. 14. Схематический чертеж конструкции промышленного синхротрона с азимутальнооднородным выпуском пучка для технологических целей: 1 – блок вакуумной откачки; 2 – обмотка электромагнита ведущего поля; 3 – ускорительная камера; 4 – азимутальное выпускное окно; 5 – генераторная лампа автогенератора; 6 – цепь обратной связи

автогенератора; 7 – блок автогенератора; 8 – антикатод электрической потенциальной ямы источника электронов; 9 – конденсатор силовой емкостной связи генераторной лампы с ускоряющим резонатором; 10 – шток «дуанта» (индуктивность резонансного контура); 11 – один из «дуантов» (емкость резонансного контура); 12 – огибающая пучка на орбите перед выпуском; 13 – область электронов источника; 14 – виток обратной связи автогенератора; 15 – термокатод электрической потенциальной ямы источника электронов; ϵ_0 – вектор напряженности электрического ускоряющего поля; В – вектор индукции ведущего поля.

Поскольку в настоящем случае имеет место режим работы с большой частотой циклов ускорения, соответственно, должен применяться источник частиц с термокатодом (§3.1).

По аналогии с §3.3 сделаем приблизительную оценку параметров ускорителя, путем сопоставления с параметрами синхротрона «Тролль-1» (см. таблицу в главе 2). Как говорилось в §1.1, при напряженности ускоряющего поля более 10⁴ В/см, в пучке можно получить 10¹¹ электронов, больше, чем указано в Таблице. С «оглядкой» на требуемую энергию частиц и энергетические возможности электромагнита ведущего поля, целесообразно принять диаметр ускорительной камеры порядка 0.3 м. Таким же приблизительно окажется и осевой размер камеры, исходя из условий получения нужной конфигурации магнитного поля. Учитывая, что размер вакуумной камеры в «Тролль-1» составляет около 100 см³, объем зоны ускорения в данном случае можно считать в ~ 100 раз большим, и интенсивность пучка принимать поэтому равной порядка 10¹³ частиц в импульсе. Такая интенсивность пучка электронов была получена экспериментально в установке коллективного ускорения ионов [25]. При частоте циклов ускорения равной единицам килогерц, средняя интенсивность пучка составит единицы миллиампер. При радиусе орбиты 0.15 м и индукции поля 0.1 Т энергия электронов равна 4.5 МэВ. Если использовать сверхпроводящий электромагнит, питающийся от силовой сети 50 Гц (частота циклов ускорения – 100 Гц) [26], то при снижении средней интенсивности на порядок и индукции поля электромагнита 4 Т энергия частиц возрастет приблизительно до ~ 150 МэВ. При этом применение ускорителя может перейти и в область работ с синхротронным излучением.

Ускоряющий резонатор ТЕМ (типа, рассмотренного в §1.1) должен формировать орбиту пучка в пристеночной области. Возбуждение ускоряющегося поля реализуется в режиме самовозбуждения генератора [23].

Графики изменения электрических и магнитного полей во времени в соответствующих блоках ускорителя приведены на рис. 15.



Рис. 15. Графики электрических и магнитных полей в узлах синхротрона с азимутальнооднородным выпуском пучка: U(t) – электрическое поле потенциальной ямы источника; B(t) – ведущее поле электромагнита; ε₀ (t) – ускоряющее высокочастотное поле.

§3.5. О схеме конструкции промышленного генератора жесткого тормозного рентгеновского излучения для дефектоскопии.

Казалось бы, конструкция ускорителя сравнительно проста, если речь идет только о сборе пучка на внутреннюю мишень. Если учесть, однако, что такой ускоритель по своему назначению становится в ряд рентгеновских аппаратов, достигших за более чем вековую историю своего существования высоких качеств по всем параметрам, дело оказывается далеко не простым.

Оставляя читателю-конструктору свободу для собственных вариантов схем рентгеновских аппаратов с применением ускорителей типа «Тролль–1» или «Тролль–2» (см. главу 2), заметим, что целесообразность реализации самой идеи состоит в миниатюрности ускорителей при высокой интенсивности пучка. Обсуждение схемы конструкции нам кажется разумным вести без всяких чертежей или рисунков, ибо принципиально новое к тому, что сказано выше, добавить трудно.

Начнем со старого классического узла – мишени для сброса пучка - аналога анода рентгеновской трубки, массивного электрода, охлаждаемого водой и впаянного в вакуумную камеру ускорителя. Здесь нужно сразу оговорить, что он внесет искажения в переменное ведущее поле и возможным решением, вероятно, может быть его удаление от зоны захвата и ускорения путем применения резонатора со стоячей волной типа Н_ш, релятивистская орбита в котором расположена на половине радиуса резонатора (электромагнита). Резонатор должен представлять собой и полость из керамики с малым углом потерь для сверхвысокочастотного ускоряющего поля и выполнять роль отпаянной вакуумной камеры. Проводящие поверхности резонатора образуются нанесением тонкого проводящего слоя, прозрачного для переменного ведущего поля, на внешнюю поверхность керамики. Источник частиц монтируется в керамике в виде термокатода и антианода, составляющих электрическую потенциальную яму (см. §3.1). Электромагнит ведущего поля выполняется на основе тонко шихтованного железного сердечника. Для охлаждения резонатора и электромагнита все устройство помещается в ванну с маслом типа трансформаторного. Как и в обычном рентгеновском аппарате, источники питания, в целях портативности самого излучателя, конструктивно отделяются и соединяются соответствующими коммуникациями.

В качестве источника возбуждения ускоряющего поля может быть использован любой сверхвысокочастотный прибор типа магнетрона с соответствующим модулятором. Напомним, что половину мощности, затрачиваемой на ускорение, пучок получает от вихревого поля. Индуктивность электромагнита настраивается на резонаторную частоту, соответствующую частоте циклов ускорения, конденсатором, расположенным в блоке питания. К полученному контуру подключается полупроводниковый прибор для создания автогенератора.

Сделаем некоторые оценки интенсивности пучка. С оглядкой на работу по коллективному ускорению ионов [25] и возможностей синхротронов типа «Тролль», считаем реальным получением 10^{12} частиц в цикле ускорения. При частоте циклов 10^3 Гц средний ток пучка составит 0.1 мА. Если энергия электронов равна 2 МэВ, то на мишенианоде необходимо рассеять мощность 200 Вт. Графики, характеризующие питание узлов ускорителя, аналогичны представленным на рис. 15.

§3.6. Формирование электронных колец в гофрированном ведущем поле. Некоторые схемы инжекции и малооборотный вывод пучка.

На некоторые экспериментальные достижения коллективного ускорения ионов [25] мы уже ссылались в связи с интенсивностью пучка в ускорителях типа «Тролль». Однако, метод предусматривал и движение колец по оси с релятивистской скоростью. Несмотря на постигшую эту работу неудачу, вполне естественно, что ее фрагменты находят свое

продолжение. На идеях осевого движения электронных колец основано содержание настоящего параграфа в связи с получением высокоинтенсивных пучков.

Как уже говорилось (§1.1), ток пучка при прочих равных условиях ограничивают кулоновские силы при захвате частиц в ускорение. Поэтому инжекция релятивистских электронов, когда начинают действовать силы магнитного стягивания, представляет практический интерес.

Схема инжекции, основанная на этом принципе, изображена на рис. 16 (A) [21]. Ведущее магнитное поле с конфигурацией в виде гофрированного цилиндра [1] должно состоять из такого количества зон ускорения, когда сумма инжектированных колец качественно превышает интенсивность «собственного» пучка – основного ускорителя. Как вариант возможного источника электронов упомянем образование электронов в области захвата от фотоионизации остатков газа. Ускорение может осуществляться бегущей волной типа H₁₁. Конечная энергия инжектируемых электронов, повидимому, должна составлять единицы МэВ. Инжекция физически может реализоваться деформацией гофрированного ведущего поля от низкочастотной бегущей волны, если к индуктивностям, образующим зоны ускорения, подключить конденсаторы (на рисунке не показаны) с целью формирования искусственной длинной линии.

Еще одна схема инжекции с осевым движением магнитных зеркал может быть реализована только двумя вспомогательными магнитными зеркалами, разнесенными на значительное расстояние по обе стороны магнитных зеркал ускорителя. После заполнения электронами образовавшейся «большой ловушки» вспомогательные зеркала сдвигаются





Рис. 16. Схематический чертеж возможной конструкции синхротрона – инжектора с осевой инжекцией предварительно сформированных «электронных колец» для доускорения (А) и эксперимент по осевому выпуску пучка (В):

А). 1 – обмотка электромагнита «гофрированного» ведущего магнитного поля ускорителя – инжектора; 2 – обмотка электромагнита основного синхротрона; 3 – волновод ускоряющего поля; 4 – пучок на орбите частиц предельной скорости в основном синхротроне; 5 – предварительно сформированные электронные кольца в инжекторе; 6 – поток фотонов для ионизации остатков газа в приосевой области инжектора (источник электронов); СВЧ – вектор напряженности ускоряющего поля; В – вектор индукции ведущего поля. В). 1 – одновитковый электромагнит; 2 – вакуумная камера; 3 – измерительный кольцевой электрод для контрольного измерения тока пучка, аналогичный электроду на рис. 5; 4 – выпускной канал; 5 – дефлектор, прозрачный для магнитного поля; 6 – пучок на орбите до выпуска; 7 – керамические высокочастотные отражатели, прозрачные для магнитного поля; 8 – плазменная пушка (источник частиц).

до положения основных. При этом происходит ускорение электронов вихревым полем при «компрессии» их в зоне захвата основного ускорителя [21].

Закончим возвращением к осевому движению орбиты пучка, но при его малооборотном выпуске (рис. 16В). Это реализовано экспериментально в работе [28]. В отличие от случая инжекции, здесь необходима высокая скорость осевого движения орбиты, чтобы избежать больших потерь частиц на дефлекторе и стенках канала. В данном случае она достигалась воздействием разнополярных импульсов напряжения с амплитудой 150 кВ и фронтом 0.5 нс. Показатель спада поля n = 0.05. Энергия электронов 5 МэВ. При этом частицы достигают канала за три оборота и имеют поперечную скорость при проходе дефлектора и входе в выпускной канал равную ~ 0.1 скорости света. Положение и форма пучка, выведенного в атмосферу, определялись по экспонированию релятивистскими электронами фотопленки. Пучок занимал всю апертуру канала размером 1 х 0.6 см, его интенсивность составляла ~ 10% от циркулирующего пучка. Такая схема выпуска целесообразна для формирования сверхкоротких импульсов релятивистских электронов.

§3.7. Совмещение оптических и ускоряющих резонаторов для лазеров на свободных электронах. Когерентное излучение электронного сгустка.

Независимо от целесообразности практической реализации лазеров на свободных электронах, рассмотрим их схемы, основанные на конструкциях, характерных для ускорителей типа «Тролль».

Основной особенностью здесь является то обстоятельство, что зоны источника частиц и формирования релятивистской орбиты пучка автоматически оказываются в области действия оптических резонаторов.

На рис. 17 изображены поперечные сечения схем конструкций двух типов резонаторов: $H_{\rm III}$ и H_{101} . Заметим, кстати, что в последнем использование магнитного поля хуже, чем в принятом здесь нами цилиндрическом $H_{\rm III}$ и составляет величину радиуса релятивистской орбиты $r_0 = 0.45$ (a/2), где а – размер стороны квадратного сечения. Оптические резонаторы (зеркала) выполняются в виде локальных отражающих покрытий высокочастотных резонаторов. В работе [29] мазер на свободных электронах назван накопителем фотонов и реализуется с помощью кольцевого зеркала на накопителе электронов «Аврора». Ход лучей изображен на рис. 17А [29]. Для линейных оптических резонаторов ход лучей изображен на рис. 17В. В работе [30] приведена формула, на основании которой можно сделать оценки стартового тока самовозбуждения в линейном оптическом резонаторе.

Отметим еще одну особенность рассматриваемых ускорителей, связанную с возможностью энергетического взаимодействия между синхротронным излучением и когерентным излучением от электронного сгустка. Действительно, последнее здесь находится в сверхвысокочастотном диапазоне длин волн в соответствии с типичным значением диапазона ускоряющих полей.



Рис. 17. Схематический чертеж возможных конструкций мазеров (лазеров) на свободных электронах (разрез по медианной плоскости электромагнитов ведущих полей): цилиндрический резонатор волны H_ш(A), призматический резонатор волны H₁₀₁.

А). 1 – электромагнит ведущего поля; 2 – циркулирующий пучок; 3 – ход лучей фотонов; 4 – резонатор $H_{\rm m}$ и оптический резонатор (совмещенные стенки); 5 – CR – когерентное излучение.

В). 1 – электромагнит ведущего поля; 2 - циркулирующий пучок; 3 – призматический резонатор; 4 – ход лучей фотонов; 5 – оптический резонатор, совмещенный с высокочастотным резонатором H₁₀₁.

В стандартном спектре синхротронного излучения в этот диапазон доходит его длинноволновая часть. Таким образом, существует спектральная линия, которая пересекает оба спектра. Мощность когерентного излучения:

$$P_{KOF} = f(p) N^2 f(\lambda),$$

где f (p) – мощность излучения одного электрона, N – количество электронов, f (λ) – формфактор сгустка. Когерентное излучение увеличивается по мере соблюдения условия $\lambda \gg x$, где λ – длина волны излучения, x – длина сгустка. Мощность синхротронного излучения P_{неког} = f (p) N, следовательно:

$$\frac{P_{\text{KOF}}}{P_{\text{HeKOF}}} = N f(\lambda),$$

где f (λ) определяется по спектру когерентного излучения.

§3.8. Возможность формирования двух независимых релятивистских пучков в одном синхротроне.

Как уже говорилось в §3.2, для полного использования магнитного поля по радиусу электромагнита в резонаторе H_{μ} необходимо произвести перезахват пучка частиц в соответствующие резонаторы.

Небезынтересно решить вопрос улучшения использования ведущего поля за счет возможности формирования двух независимых пучков в одном синхротроне. Схема суперпозиции двух типов ускоряющих полей H_m и TEM показана на рис. 18. Условия ускорения в образующемся при этом негармоническом высокочастотном поле рассмотрены в [7]. Качественный анализ показывает, что в таком поле могут сформироваться два независимых пучка с радиусами релятивистских орбит, соответствующих длинам волн слагаемых полей. Вообще же рассмотрение механизма захвата частиц в ускорение и возможность формирования независимых пучков, источников синхротронного излучения в этих условиях – предмет отдельной статьи.

§3.9. Вывод синхротронного излучения с полной орбиты пучка и о возможности его нестандартного применения.

Сочетание конструкций рассматриваемых ускорителей с зеркалами разного типа не ограничивается только схемами §3.7. Рассмотрим вывод синхротронного излучения с полной стационарной орбиты пучка через разъем в резонаторе и электромагните ведущего поля и сканирование им той или иной области пространства.

Схема вывода излучения с помощью кольцевого зеркала изображена на рис. 19. Меняя угол раствора зеркала, можно направлять синхротронное излучение в разные области пространства, включая его фокусировку в приосевую область ускорителя [31]. В работе [10] предлагается исследовать условия распространения синхротронного излучения в различных областях околоземного пространства, включая особые случаи, например, распространение сквозь плазменную оболочку спускаемых космических аппаратов. При этом, очевидно, следует менять критическую длину волны спектра для получения полной картины.

Излучатель в этом исследовании должен применяться как в земных, так и в космических условиях. Для последних существуют факторы, облегчающие конструкцию: космический вакуум, относительно низкая температура, что возможно, позволит ликвидировать и азотную «рубашку» криостата сверхпроводящего электромагнита - держателя пучка. Попутно должны быть исследованы и отражающие свойства синхротронного излучения от различных материалов и поверхностей. При благоприятных результатах в целом, или для особых случаев, когда прохождение радиоволн по тем или иным причинам затруднительно, можно обсуждать возможность использования синхротронного излучения для радиосвязи и локации.

В работе [10] синхротронное излучение рассматривается в качестве несущей частоты. Особенность состоит в том, что селекция по частоте производится не по несущей, а по ее модуляции – временной структуре синхротронного излучения. За фотоприемником должен стоять фильтр (селектор) в виде резонатора, настроенного на частоту передатчика синхротронного излучения – ускоряющего поля держателя пучка. При этом фильтр отсечет и постоянную составляющую фототока от засветки Солнцем околоземного пространства.



Рис. 18. Формирование двух независимых релятивистских пучков в одном синхротроне (суперпозиция полей H_ш и TEM): 1-обмотка электромагнита ведущего поля; 2ускорительная камера и корпус резонатора H_ш; 3-желобковая полуволновая длинная линия TEM-типа; 4-короткозамкнутая перемычка полуволновой желобковой длинной линии; 5-кабель возбуждения H_ш – поля; 8, 9-огибающая релятивистских пучков; 10источник частиц; 11-вектор индукции ведущего поля; 12-вектор поля H₁₁₁; 13-вектор поля TEM.



Рис. 19. Схема вывода синхротронного излучения с полной орбиты пучка и фокусировка его в малую область пространства: 1 – кольцевое зеркало; 2 – сечение пучка; 3 – синхротронное излучение на поверхности зеркала; 4 – направление отраженных лучей.

Если речь идет не о локации, для которой естественная временная структура синхротронного излучения решает дело, а о радиосвязи (речь, телевидение), то необходима фазовая модуляция импульсов синхротронного излучения. Она вводится через фазовую модуляцию ускоряющего поля. При этом надо иметь в виду инерционность от установления радиально-фазовых колебаний сгустка держателя пучка. В итоге будет иметь мест сужение спектра передаваемых частот. Заметим, наконец, что управление синхротронным излучением с помощью зеркала до наших работ рассматривались в [32].

Заключение

Из изложенного видно, что реализована только небольшая часть схем ускорения из «Тролль-проекта». Целый ряд идей нуждается в расчетах даже для качественного определения возможности их осуществления.

Настоящей статьей мы рассчитываем обратить внимание физиков в России и за рубежом на эту тематику. Очевидно, что приводимые схемы ускорения могут быть осуществлены с сильно разнящимися параметрами и конструкциями, в зависимости от требований к пучку и ускорителю. По нашему мнению, не исключена возможность коммерческого применения «Тролль–проекта» для фирм, способных реализовать ту или иную схему ускорения для технологических целей. Несомненна и научная ценность, «Тролль–проекта», которую конкретно сегодня оценить трудно.

Перечень проблем можно продолжить, однако ясно, что он сузится при конкретном интересе к теме со стороны специализированных учреждений. Мы не исключаем развитие тематики «малой кровью», например, разработки ее теоретически в дипломных проектах и диссертациях, компьютерное моделирование. Надеемся, что определенное место она может занять и в будущих учебниках по ускорителям заряженных частиц.

Описанию сути экспериментов из разных областей науки, техники и технологии на действующих классических ускорителях заряженных частиц посвящена обширная литература - целые библиотеки статей и книг. В данном обзоре необходимо было принять жесткие ограничения, чтобы «не утопить» рассматриваемую тему в возможных смежных проблемах.

«Ниша» изложенного здесь направления качественно ясна. Работы в области классических ускорителях проводятся в течение более полувека. Вероятно, еще не все потеряно и для рассматриваемых здесь машин.

Есть еще деликатный вопрос о приоритете, или значимости тех или иных разработок или изобретений. Мы неоднократно сталкивались и с плагиатом, и с утверждением, что все компоненты рассматриваемого здесь направления опубликованы ранее. Например, уважаемый физический журнал в Санкт-Петербурге отклонил нашу статью с рассмотрением возможности ускорения электронов на классическом циклотроне на принципе «Тролль–проекта» (§3.3) на том основании, что в литературе ускорение электронов на циклотроне было отвергнуто (низкая возможная максимальная энергия порядка сотен киловольт), а в «Тролль–проекте» ничего нет нового, поскольку автофазировка была открыта еще в середине прошлого века. Вспоминается случай с Г.И. Будкером. Когда он излагал разработанную им теорию стабилизированного пучка, представляющего собой более чем оригинальное, уникальное образование из электронов [1], да еще осмелился говорить о приоритете, один из слушателей упрекнул его в нескромности на том основании, что электрон давно известен. Недаром, наверное, существуют учреждения по защите авторских прав и институты патентной экспертизы.

Возможно, некоторый интерес представит освещение наших работ в журнале «Успехи физических наук» [33] и в научно – популярном журнале «Наука и жизнь» [34].

Благодарности

Многих из тех, кто помогал нам и поддерживал нас, уже давно нет в живых. Автор отдает себе отчет в значимости творческого сотрудничества с ними и пользуется случаем почтить светлую память.

- Степанова Б.М., профессора, основателя и первого директора Института оптико-физических измерений Госстандарта СССР, постоянного и заинтересованного шефа темы «Тролль-проект».
- Кипаренко В.И., зам. Министра Госстандарта СССР, посетившего нашу лабораторию и всячески содействовавшего ее благополучию.
- Наумова А.А., член-корреспондент академии наук России, зам. директора института Ядерной физики в Новосибирском научном центре и Физики высоких энергий в Протвино, учителя и коллегу.
- Будкера Г.И., академика, основателя и директора института Ядерной Физики в Новосибирском научном центре, учителя и в науке, и в жизни. Теперь этот институт носит его имя.
- Флерова Г.Н., академика, зав. лабораторией ядерных реакций в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне, помогавшего нам ценным оборудованием.
- Минца А.Л., академика, директора Радиотехнического института Академии наук СССР, первым поддержавшего эту работу на международной конференции в 60-е годы.
- Прохорова А.М., Лауреата Нобелевской премии, академика, директора Института общей физики Академии наук в России и основателя фонда его имени, материально поддержавшего проведение важного эксперимента.

И, наконец, благодарность тем, кто, к счастью, может нас услышать, и чье доброе отношение к нам мы высоко ценим и хорошо помним:

- Соросу Дж., за учреждение программы «Заслуженные соросовские профессора».
- Скринскому А.Н., академику, директору института им. Г.И. Будкера в Новосибирском научном центре, за рекомендацию о поддержке по программе Дж. Сороса «Заслуженные соросовские профессора» и поддержку настоящей работы.
- Тумайкину Г.М., профессору, сотруднику института им. Г.И. Будкера, за доброжелательную и полезную критику настоящего обзора.
- Хиронари Ямаде, профессору токийского университета, посетившему нашу лабораторию и поддержавшему эту работу в конкурсе фундаментальных исследований Дж. Сороса.
- Членам оргкомитета конференции «Вакуумный ультрафиолет 10»: Petrofs Y., Nenner I., Wuillemier F., пригласивших нас на международную конференцию в Париже с соответствующей материальной поддержкой.
- Романовскому В.Ф., доктору, заведующему лабораторией института оптикофизических измерений;
- Саприцкому В.И., профессору, заведующему лабораторией института оптикофизических измерений, за материальную и моральную поддержку в тяжелый период работы в институте.
- Черниловской Г.З., доктору, за помощь в подготовке настоящего обзора к изданию.

Литература

- 1. Будкер Г.И., Сборник трудов. М., «Наука», 1982 г.
- 2. Панасюк В.С., Атомная энергия, т. 67, вып. 2, с. 114, 1989 г.
- 3. Сахаров А.Д., Успехи физических наук, т. 88, с. 715, 1966 г.
- Панасюк В.С., Соколов А.А., Степанов Б.Д., Атомная энергия, т. 33, вып. 2, с. 9074, 1972 г.
- 5. Новиков М.Ю., Панасюк В.С., Самошенков Ю.К. и др. Атомная энергия, т. 49, вып. 1, с. 34, 1980 г.
- 6. Панасюк В.С., Терешкин Ю.М., Хромченко В.Б., Приборы и техника эксперимента, № 1, с. 30, 1984 г.
- 7. Коломенский А.А., Лебедев А.Н., Теория циклических ускорителей. М., Физматгиз, 1962 г.
- 8. Кнопфель Г., Сверхсильные магнитные поля. Пер. с англ., М., «Мир», 1972 г.
- 9. Меньшиков Л.И., Недосеев С.А., Смирнов В.П. и др. Атомная энергия, т. 71, вып. 6, с. 511, 1991 г.
- 10. Панасюк В.С., Космические исследования, т.33, № 5, с. 468, 1995 г.
- Аневский С.И., Квочка В.И., Панасюк В.С. и др., Измерительная техника, № 10, с. 2, 1977 г.
- 12. Аневский С.И., Журнал технической физики, т. 55, вып. 1, с. 212, 1985 г.
- Anevsky S.I., Vernyi A.E. and Khromchenko V.B., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A-26, p. 330, 1987.
- 14. Anevsky S.I., Vernyi A.E., Khromchenko V.B. et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A-347, p. 573, 1994.
- 15. Панасюк В.С., Измерительная техника, № 2, с. 28, 1993 г.
- 16. Квочка В.И., Колесов Г.В., Панасюк В.С. и др., Импульсная фотометрия (сборник статей). Л., Машиностроение, 1981 г.
- 17. Аневский С.И., Верный А.Е., Панасюк В.С. и др. Приборы и техника эксперимента, № 2, с. 129, 1988 г.
- 18. Шеставин Н.С., Лаптиенко Ф.Я., Усов Н.Г. и др. Журнал технической физики, т. 58, вып. 1, с. 126, 1988 г.
- 19. Tatcishi H. at alt., JEEE Trans. Appl. Supercondet., V. 3(1), p. 555, 1993.
- 20. Richl F., Bernstoff S., Frohling R. et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A-268, p. 262, 1988.
- 21. Панасюк В.С., Атомная энергия, т. 71, вып. 6, с. 541, 1991 г.
- 22. Herlach F., Phisica B, v. 211, p. 1, 1995.
- 23. Панасюк В.С., Самошенков Ю.К., Симановский М.Ф., Атомная энергия, т. 67, вып. 9, с. 124, 1989 г.
- 24. Makulkin A.V., JEEE Particle Accelerator Conf., p. 3702, 1993.
- 25. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А., Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. М., Атомиздат, 1979 г.
- 26. Zacaze A. et al., JEEE Translation on Magnetic, v. 28, No. 1, p. 767, 1992.
- 27. Jamada H., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A-304, p. 700, 1991.
- 28. Богданов В.В., Кононогов Г.А., Новиков М.Ю. и др., Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, т. 1, с. 329, 1982 г.
- 29. Tomimasu T., Sinchrotron Radiation News, No. 4, p. 28, 1988.
- Калчев Д.И., Перельштейн Э.А., Журнал технической физики, т. 59, вып. 1, с. 130, 1988 г.
- 31. Квочка В.И., Панасюк В.С., Романовский В.Ф. и др. Журнал технической физики, т. 44, № 6, с. 1210, 1974 г.
- 32. Кунц К., Синхротронное излучение. Пер. с англ., М., «Мир», 1981 г.
- 33. Панасюк В.С., Успехи физических наук, т. 148, с. 723, 1986 г.
- 34. Панасюк В.С., «Наука и жизнь», № 2, с. 87, 1993 г.