

С345
К-142

Казанский Л.С.

Б 2-9-4163.

+

Б-2-9-4163

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

~~БЭ-4163~~

Г.С.КАЗАНСКИЙ

БЭ-9-4163

С 345
К-142

с. ф. 2339

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ЗАДАЧИ УСКОРИТЕЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ.

(Обоснование направления работ по автоматической
оптимизации ускорителей).

25 июля 1968 г.

г.Дубна, июнь 1968 года

Объединенный институт
ядерных исследований
БНБ МОТМА

Ч А С Т Ь I .

Изучая динамику развития техники ускорения заряженных частиц нетрудно заметить своеобразную закономерность. Примерно каждые семь-восемь лет перед инженерами возникают сложные технические проблемы в области создания уникальных установок-генераторов ~~космических~~ частиц больших энергий. Теоретическая и экспериментальная физика, обобщая огромный статистический материал, приходит каждый раз к необходимости иметь частицы с энергией на порядок больше той, при которой была получена предыдущая информация о природе ядерных сил и структуре материи.

Всего 20 лет понадобилось учёным, инженерам и техникам, чтобы овладеть управляемыми пучками заряженных частиц, обладающими энергиями в несколько десятков Гэв (см.рис.1).

Открытие принципа жёсткой фокусировки положило начало новому качественному скачку в области создания устройств для ускорения частиц до энергий 500-1000 Гэв. Перспектива создания таких установок тесно связана с необходимостью бурного развития техники эксперимента, систем управления и центров обработки информации.

Многочисленные научные дискуссии по физике высоких энергий за последние 3-4 года позволили наметить реальные пути развития ускорительной техники на ближайшие 10-15 лет. Если на конференции по физике ускорителей в 1963 году многие научно-технические проблемы обсуждались как желательная перспектива, то дальнейшие форумы учёных открывали всё новые и новые страницы конкретных технических решений воплощенных, или находящихся в стадии осуществления.

В результате ооьшой творческой и созидательной работы инженеров-физиков, инженеров-ускорительщиков, 1967 год был ознаменован запуском самого мощного ускорителя протонов (70 Гэв машина в г.Серпухове (СССР).) Это замечательное достижение науки и техники Советского Союза позволит учёным проникнуть еще глубже в недра атома и выйти на новую ступень познания микромира. Однако, ядерная физика безжалостно требует существенного увеличения энергий. Это понимают инженеры-ускорительщики. В США в 1972 году предполагается запустить в эксплуатацию протонный ускоритель на 200 Гэв. Немного позднее, ЦЕРН обогатит свои лаборатории 300 Гэв установкой. Усиленно прорабатываются проекты 1000 Гэв машин в Советском Союзе (РТИ АН СССР и НИИЭФА) и в Брукхейвенской лаборатории (МША). Техническое осуществление этих проектов в принципе вполне реально. Несмотря на интенсивный рост числа ускорителей за последние годы нетрудно заметить (см.рис.1), что пока верхняя граница энергий проходит в районе 70 Гэв и такое положение будет существовать ещё довольно долгое время. Два важных фактора ограничивают творческую инициативу создателей ускорительной техники в их стремлении создавать все более мощные установки.

1. Уровень развития современной техники и промышленной технологии.

2. С ростом энергии ускорителей растет их стоимость, что является весьма ощутительным бременем для национального бюджета.

Разумное разрешение этих трудностей безусловно находится в прямой связи с важностью и актуальностью задач, которые ставит перед наукой ядерная физика. Нужны ли столь большие энергии, о которых шла речь и разумно ли вкладывать огромные средства в создание ускорителей сверхвысоких энергий?

В качестве предпосылки к программе исследований уместно привести высказывания известных физиков-ядерщиков, которые являются обобщенным мнением всех специалистов в области фундаментальной теории атомного ядра.

Опенгеймер: "Мы не понимаем почему μ - мезон в 200 раз тяжелее электрона, или почему он обнаруживает избыток двух нейтронов. Мы не понимаем точного механизма взаимодействия частиц при низких энергиях. Однако, мы знаем, насколько перспективны энергии новых, больших ускорителей. Открываются перспективы нового. Новые частицы, новые явления, которые помогут объяснить недоумения сегодняшнего дня". (*"Nucleonics"*, Vol. 23, No. 2 p. 19)

Файнберг: "Прикладная физика высоких энергий черпает свои возможности из фундаментальной теории физики ядра. А для этого нужны очень высокие энергии..."

Для наблюдения объектов микромира необходимы носители электромагнитной субстанции с очень короткой длиной волны. Частицы больших энергий коротковолновы, причём, чем больше E , тем меньше λ

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

За последние годы на ускорителях были проведены очень важные эксперименты, которые позволили расширить наши представления о структуре материи. К 1964 году было открыто уже 40 элементарных частиц (для сравнения: в 1920 году были известны всего 2 частицы электрон и протон). Результаты эксперимента показывают, что мир частиц многообразен и сложен. Теперь уж не возникает сомнений в том, что элементарные частицы - сложные объекты, не менее сложные, чем атомы и молекулы.

Открытие резонансных состояний в системе взаимодействующих мезонов указывает на сложную структуру мезонной материи. В настоящее время физика высоких энергий находится накануне нового скачка в глубь материи, в глубь тайны природы вещества и шаг этот сопряжен с немалыми трудностями. Микромир полон загадок. Чем глубже мы проникаем в недра материи, тем более совершенными приборами мы должны располагать. Мы должны иметь высокоэнергетический зонд, которым являются ускорители заряженных частиц на сверхвысокие энергии. Этим самым мы обеспечиваем сильное взаимодействие объектов микромира в ^{системе} центра масс.

Чем сильнее взаимодействие, тем важнее получение информации в области малых пространственно-временных промежутков. Современная методика исследований приводит в ряде случаев к противоречиям в теоретических построениях и чем сильнее взаимодействие, тем труднее применять методы современного анализа. Привычные каноны измерений уже не могут удвлетворять анализу новых явлений. Обнаруженные резонансные состояния материи в процессе сильных взаимодействиях указывают на присутствие весьма короткоживущих субстанций материи, время жизни которых $\sim 2 \cdot 10^{-22}$ сек. Уже сейчас физики располагают информацией о явлениях характеризующихся расстояниями порядка барионных длин.

$$\bar{a}_M = \frac{\hbar}{mc} \approx 2 \cdot 10^{-14} \text{ см}$$

Стоит вопрос о выборе фундаментальных параметров микромира и, естественно, о методике исследований и измерений с их применением. При переходе к малым пространственно-временным областям информации фундаментальными параметрами могут стать:

1. Электромагнитный радиус электрона $\frac{e^2}{mc^2} = 2,8 \cdot 10^{-13}$ см,
либо компоновская длина π - мезона

$$\frac{\hbar}{mc} = 1,4 \cdot 10^{-13} \text{ см.}$$

2. Комптоновская длина Нуклона

$$\frac{\hbar}{Mc} = 2 \cdot 10^{-14} \text{ см.}$$

3. Характеристическая длина слабых взаимодействий

$$\frac{\hbar}{G \cdot F} = \sqrt{\frac{G \cdot F}{\hbar \cdot c}} = 6 \cdot 10^{-17} \text{ см.}$$

Наиболее вероятные претенденты, с учётом дальнейшего уменьшения пространственно-временного объёма, информации: \bar{a}_M и \bar{a}_F
Если принять их в руководство, то оказывается их применение возможно, если $\bar{p} > mc$ ($\pi^+ \bar{p}$ - рассеяние на 180°), т.е. при длине не $\bar{a}_M = 2 \cdot 10^{-14}$ см. Нужна энергия ~ 70 Гэв, а для $1 \cdot 10^{-17}$ см (скажем $K^+ \bar{p}$ - рассеяние) нужны энергии несколько сотен Гэв в центре масс. Для изучения электромагнитной структуры π - мезона необходимо осуществить рассеяние π - мезонов на электронах, что потребует энергии 100 Гэв и более.

Последняя задача представляет фундаментальный интерес. Теория требует сильных взаимодействий. Сильные взаимодействия осуществимы только при больших энергиях.

Что позволят решить сверх высокие энергии? Обобщая материалы дискуссий и конференций можно сказать следующее:

1. Высокие энергии позволят осуществить переход к новому классу явлений при сильно энергетическом взаимодействии.

2. Позволят проводить весьма тонкие измерения структурного построения ядер и осуществить экспериментальную проверку основных положений квантовой механики.

3. Помогут досконально изучить одну из интереснейших загадок материи - явление гравитации. Напр. определить: $\bar{v}_{\text{гравит.}} = \sqrt{\frac{h \cdot c}{\epsilon}}$

4. Стимулируют развитие направлений техники измерений сверхмалых величин, без которых невозможно проникновение вглубь материи

5. Позволят расширить наши знания о структуре материи, обеспечивая рождения новых частиц и антиядер с большим атомным номером.

6. Позволят провести:

а) Исследования короткоживущих состояний материи.

б) Поиск промежуточного бозона.

в) Исследование зависимости сечений взаимодействий в функции энергии.

Этот далеко не полный перечень задач, необходимость решения которых ни у кого не вызывает сомнений, является тем убедительным векселем, позволяющим настаивать на строительстве ускорителей на сверхвысокие энергии. Рассмотрим кратко технические возможности осуществления программы строительства ускорителей на сверхвысокие энергии. Интенсивное строительство ускорителей в 60-х годах (см. рис. I) говорит о том, что ускорительная техника накопила богатый опыт создания весьма качественных магнитных систем, систем электроники, энергетики и прецизионной измерительной аппаратуры.

В частности, опыт отечественной техники строительства ускорителей значительно облегчил задачу создания 70 Гэв машины в Серпухове, что позволило уже в 1967 году выйти нашим учёным физикам на передний край мировой науки и в ядерной физике. Надо сказать, что скупулёзный анализ мирового состояния ускорительной техники, проведенный рядом зарубежных и советских учёных, позволяет утверждать, что современный уровень техники эксперимента

(имеется в виду возможность её использования при более высоких энергиях) разрешает использование ускорителей с энергией 100 - 300 Гэв. Технологические возможности промышленности в состоянии обеспечить строительство таких ускорителей.

Однако, дальнейшее увеличение энергетического потенциала физических исследований ставит достаточно жёсткие требования на техническое исполнение ускорительных и регистрирующих устройств.

Сделаем несколько замечаний в этом отношении:

С ростом энергии ускоряемых частиц совершенствовалась и усложнялась аппаратура физического эксперимента (АФЭ). Новый уровень методических исследований потребовал достаточно сложных систем управления пучками ускоряемых частиц. Возросли требования к надёжности работы аппаратуры и точностям выдерживания параметров комбинированных режимов управления. Проследим этот рост требований на упрощенных символических схемах рис. 2.

Если в начале 50-х годов физиков-экспериментаторов вполне устраивала технологическая схема проведения эксперимента (рис.2а) Ускоритель (ЛУ + СФ) регистрирующая аппаратура (АФЭ) с обычным оперативным управлением (ОУ), то в 60-х г. эта схема на фоне успехов вычислительной техники и техники регистрации физических процессов стала самым настоящим аномализмом.

Появились системы стабилизирующих и функциональных обратных связей, системы программного управления, системы автоматической обработки результатов физических исследований (рис.2б). Электронные вычислительные машины, схемы логического управления режимами физического эксперимента начинают прочно входить в технологический процесс проведения физических исследований. Экстрополируя во времени, нетрудно показать, что ускорительные установки на энергии 500-1000 Гэв будут представлять из себя комплексы сложнейших

конструкций, разнесенных в пространстве, выполняющих различные функции одного единого процесса. Контроль режимов отдельных установок и контроль общего технологического процесса безусловно выйдет за пределы обычных представлений об эксплуатации энергетического и радиоэлектронного оборудования.

Разнесение систем датчиков и исполнительных устройств по 20 км орбите 1000 Гэвного ускорителя, много-стадийность инжектирующих устройств, режимы работы накопительных колец, регистрация и обработка информации - все это безусловно исключает возможность эксплуатации ускорителя обычным оперативным способом. Возникает однозначная необходимость создания единого центра автоматического управления всеми процессами включающими в себя все элементы технологического процесса. Технологическая схема физического эксперимента на энергиях 200-1000 Гэв в самом недалеком будущем будет выглядеть примерно так, как изображено на схеме рис.2 в . Необходимо заметить, что совершенствование методики физического эксперимента на действующих ускорителях, уже сейчас ставит новые требования к точностям и стабильностям режимов управления. Это обстоятельство заставляет инженеров-ускорительщиков оснащать действующие установки элементами автоматического управления и оптимизации режимов работы ускорителя.

Большие работы в этом направлении ведутся в Беркли (США), на Аргонском ускорителе, в Кембридже и Брукхейвене. Работы ведутся с перспективой использования их результатов для 200 и 1000 Гэв машин.

У нас в СССР аналогичные работы проводятся в РТИ АН СССР (кибернетический ускоритель, автоматическое управление Серпук. ускор. в ин-те Кибернетики АН УССР (Киев), где созданы системы оптимизации режимов работы циклотронов. Большое внимание вопросам

оптимизации режимов управления уделяется в ускорительной лаборатории Томского политехнического института.

2. Теперь посмотрим как обстоит дело с аппаратурой физического эксперимента. Как известно, в настоящее время комплекс аппаратуры, применяемых физиками - экспериментаторами для исследований на ускорителях включает в себя: пузырьковые камеры нескольких типов, искровые и стриммерные камеры, многосчётчиковые системы, эмульсии, полупроводниковые детекторы, транзисторные мишени и др. Сюда же как вспомогательное, но обязательное оборудование, следует отнести сепараторы частиц для "чистых" каналов. Каково же будущее этих анализаторов информации ядерных процессов при переходе в более высокий диапазон энергий?

В принципе, используемая в настоящее время методика исследований может быть распространена на диапазон энергий до 1000 Гэв. Однако, при этом возникает ряд проблем, которые должны быть разрешены в самом недалеком будущем.

I. Пространственная регистрация событий (камерная методика), возникающих при ядерном взаимодействии, безусловно, найдет себе применение и при энергиях 1000 Гэв при учёте следующих факторов:

а) Необходимость существенного (на порядок и более) повышения точности отсчёта кривизны траекторий сильно энергетических продуктов реакции взаимодействия частиц с веществом. Для этого надо либо сильно увеличивать размеры камер, либо применять сильные магнитные поля. И то, и другое на сегодняшний день только задача. Увеличение габаритов камеры ограничено технологическими возможностями (проблемы объёма магнитного поля, проблемы стекла и др.) .

Второй путь более предпочтителен и перспективен, в связи с тем, что сейчас довольно интенсивно развивается направление работ по созданию сверхпроводящих магнитов с использованием криогенной техники. Примерные данные такого магнита, исходя из реальных возможностей: в объёме с вертикальной апертурой 1,2 м и $\phi \approx 2,5-3$ м. $H_{max} = 100$ кэ. ; $AW \approx 4 \cdot 10^8$; $P \sim 13000$ Мэж. В данном случае возможно размещение в направлении движения частиц малых рабочих объёмов с сильными магнитными полями.

б) Сложность идентификации, которую в принципе можно решить объёмным расположением регистрирующей ~~и~~ оптики.

в) Сложность регистрации короткоживущих частиц (например: при времени жизни гиперона 10^{-14} сек на 1000 Гэв длина пробега всего 2 мк).

2. Применение искровых камер на более высоких энергиях возможно при некотором уменьшении времени "деразряда" и счётчиковой идентификации.

3. Применение счётчиковых систем, систем пересчёта, схем совпадений, потребует уменьшение разрешающего времени до 10^{-12} - 10^{-14} сек. Надо сказать, что в настоящее время в этом направлении сделано немало (цифра 10^{-12} сек обретает уже реальность). Что касается непосредственно регистраторов, то основное применение будет видимо за черенковскими счётчиками с газовым наполнением, так как θ^e (углы между направлением черенковского излучения и направлением движения заряженной частицы) при $\beta \approx 1$ достаточно малы.

4. Полупроводниковые детекторы найдут свое применение на высоких энергиях, однако, их защита от интенсивного облучения приведет к созданию высококачественных избирательных усилителей способных усиливать сигналы на уровне шумов.

5. Для исследования электромагнитных взаимодействий частиц высоких энергий имеется уже сейчас целый ряд практических предложений. В частности, по использованию эффекта вторичной эмиссии

$$\sigma = f(\underline{E}) \text{ и другими методами.}$$

6. Наконец, эмульсионная методика применима во всем диапазоне сверхвысоких энергий.

Несколько слов о датчиковых системах. На сверхвысоких энергиях достаточно серьёзной проблемой станет методика вывода частиц, потребует^{ся} создания специальных импульсных систем вывода. По-новому должна решаться проблема внутренних мишеней и сепараторов заряженных частиц. Видимо основной способ вывода частиц будет заключаться в создании значительных "доворачивающих" магнитных полей, создании магнитных искажений для резонансного возмущения пучка, создании "забрасывающих" магнитов и т.д. Прямой метод вывода пучка представляется затруднительным, хотя бы исходя из следующих цифр: Отклонение пучка магнитным полем:

$$\delta = \frac{B_z}{B \cdot \rho} \cdot L$$

где B_z - величина поля в отклоняющем магните,

L - длина магнита,

$B \cdot \rho$ - магнитная жёсткость протвнов.

Для 1000 Гэв; $B_z = 15 \cdot 10^3$ Тл; $L = 2$ м; $\delta = 0,9 \text{ mrad}$

т.е. отклонения практически нет. Увеличение за счёт усложнения магнита вряд ли целесообразно, поэтому решение видимо будет состоять из схемы возмущения бетатронных колебаний и системы заброса в доворачивающий магнит. Довольно удачное решение по системе забрасывающего магнита сделано О'Нейлом, состоящее в использовании ферритовой линии задержки с временем работы:

$$t_{\text{ферр}} \ll t_{\text{оср}}$$

Например, при частотном способе управления пучком, (делая обратную экстрополяцию к действующим ускорителям), необходимо иметь стабильность связи между частотой ускоряющего напряжения и магнитным полем не хуже $1 \cdot 10^{-6}$. Эта цифра является перспективной, но не фантастической.

Применение сепараторов заряженных частиц, будет связано с увеличением их размеров (протяжённость поля воздействия) и созданием больших градиентов электрических и магнитных полей. Возможно, что достижения в области криогенной техники будут способствовать решению этих проблем.

Заканчивая анализ технических и технологических возможностей промышленности для обеспечения экспериментов в области очень высоких энергий можно утверждать следующее: В вопросах технического оснащения физики сверхвысоких энергий существуют так называемые программы максимум и программа минимум. Минимальная программа строительства ускорителей (в диапазоне энергий 100-300 Гэв) может быть осуществлена в ближайшее десятилетие. Эта программа может быть обеспечена уже действующими физическими приборами. Единственное её требование, самое, пожалуй, важное - это ликвидировать пробелы в вопросах автоматического управления режимами физического эксперимента и в совершенствовании систем обработки информации. Решение этих вопросов одновременно решит и другие вопросы, связанные со стабилизацией и оптимизацией режимов. Это требование выполнимо и не вызывает никаких сомнений.

Программа максимум (диапазон энергий 500-1000 Гэв) - это довольно серьёзная перестройка систем управления и регистрации процессов. Усложнение схем и насыщенность режима промежуточными функциональными преобразованиями объекта исследования, ставит

совершенно новые задачи перед службой обеспечения режимов физических исследований. В области сверхвысоких энергий исполнение программы-максимум, по-нашему мнению, займет по крайней мере два десятилетия. Причём, видимо, следует учитывать здесь и немаловажный экономический фактор. Остановимся на нём подробнее и постараемся показать, что делается в этом направлении.

Человечество затрачивает на физику высоких энергий (ФВЭ) ежегодно от 1/4 до 1 млрд.рублей и это составляет примерно 10% от общей суммы средств выделяемых правительствами всех стран на научные исследования вообще. Ускорители заряженных частиц-дорогостоящие сооружения как в смысле строительства, так и в смысле эксплуатации. По сильно усредненной мировой статистике стоимости ускорителей можно сказать, что установка для ускорения заряженных частиц до энергий 10-30 Гэв обходится в 50-70 мл.руб. Если бы стоимость установок возрастала пропорционально росту энергий, то на ускоритель 1000 Гэв необходимо было затратить сумму близкую к 10 мл-рдм руб. Конечно, такие установки " не по карману" человечеству и их создание можно было бы отнести к области научной фантастики.

Однако, действительное положение вещей складывается несколько иначе. На рис.3 нами была сделана попытка на основании далеко неполных данных мировой статистики по ускорительной технике, изобразить зависимость роста стоимости ускорителей от их энергии. Оказалось, что этот приближенный график довольно объективно отражает характер роста затрат на создание ускорителей. Начальный участок характерен для 50-х годов, когда общий уровень техники и промышленного производства не позволял строить дешево уникальные вещи. С годами приходил опыт и совершенство технологии и кривая вместо резкого роста принимает довольно плавный характер, что сопрово-

ждается бурным ростом количества ускорителей в 60-х годах. Этот показательный фактор лег в основу дальнейшего развития проектных работ по созданию ускорителей на более высокие энергии. Изучая опыт строительства уже действующих ускорителей и подходу строго научно к выбору основных параметров установок, учёные и инженеры научились искусству экономичного построения своих проектов. Приведем несколько примеров:

1) В результате тщательных исследований оказалось экономически невыгодным строительство линейных ускорителей для протонов (по типу ускорителя с дрейфовыми трубками) на энергию свыше 50 Мэв. Свыше этой энергии резко возрастала потребляемая в/ч мощность. Оказалось возможным более удачное решение - создание комбинированных систем: предварительная (дрейфовые трубки) и заключительная - волноводная (бегущая волна). Такое решение дало экономичную конструкцию линейного ускорителя на энергию 200 Мэв. Дальнейшее экономичное увеличение энергии может дать криогенная техника - (снижение потерь и, следовательно, потребляемой мощности).

2) Своеобразным инженерным и экономическим решением является оптимальный выбор инжекционных систем для больших ускорителей. Разработчикам удалось выяснить зависимость между значением поля инжекции и энергией инжектируемых частиц (см. рис.4). Это весьма важное обстоятельство значительно упростило выбор начальных условий в основном ускорителе и позволило заложить основы экономическому построению в/ч систем.

Необходимое сочетание поля инжекции $\frac{H_0}{\beta}$ и энергии инжекции $\frac{W_0}{\beta}$ определяется следующими соображениями:

1. Энергия инжекции должна быть достаточно велика чтобы:

а) во-первых - обеспечить релятивистский режим уже при инжекции в основную машину. Это дает возможность создания высокодобротных высокочастотных систем без модуляции частоты (существенное упрощение) и получение значительных напряженностей электрических ускоряющих полей, что в свою очередь определяет выбор количества ускоряющих станций по орбите ускорителя.

б) Во-вторых, при высокой энергии инжекции имеет место малый энергетический разброс и малый фазовый объем пучка за счёт слабого воздействия сил в момент переходного режима.

Это очень важное обстоятельство, т.к. малый эмиттенс инжектируемого пучка определяет выбор апертуры камеры основной машины, а, следовательно, и экономичность в построении магнитных систем.

2. Выбор оптимального значения поля инжекции определяет необходимое перекрытие в изменении магнитного поля за цикл ускорения и необходимую кратность ускорения.

3. Об экономичности выбора высокочастотных систем было сказано выше.

Это далеко не полный перечень мер предпринимаемых учёными и инженерами создателями ускорителей на сверхвысокие энергии. Строго научный и экономичный подход к решению проблем ускорительной техники, позволил создать проекты ускорителей на 200, 300 и 1000 Гэв, стоимостью, не вызывающей безнадёжного настроения среди учёных и инженеров-специалистов в области физики высоких энергий. (Как видно из графика рис.3 стоимость 1000 Гэв ускорителя лежит в пределах 800-900 мл.долларов).

Итак, анализ технических и экономических критериев, определяющих поступательное развитие физики высоких энергий показал,

что: 1) Уровень техники строительства, энергетики, электроники на данном этапе позволяет осуществить строительство ускорителей на 200-300 Гэв.

2) Отставание в области управления, оптимизации режимов и обработки информации, в свете требований физического эксперимента, может быть преодолено. Гарантия тому - значительные успехи в этой области.

3) Экономические затраты находятся в разумных пределах и безусловно окупятся в короткий срок фундаментальными открытиями в области физики атомного ядра, в которых заинтересована прикладная физика.

4) Строительство суперускорителей в настоящее время представляется затруднительным, как с точки зрения экономической, так и технической. Однако, необходимо уже сейчас вести серьёзные научно-исследовательские работы по рабочему проектированию и моделированию систем оптимизации и управления, а так же физических явлений, ожидаемых при многостадийном ускорении.

5) Необходимость строительства ускорителей сверхвысоких энергий очевидна. Без генераторов частиц сверхвысокой энергии невозможно проникнуть в сокровенные тайны ядра.

6) Принцип, использующий эффект соударения ускоренных пучков, перспективен. Он в состоянии взять на себя решение многих задач, выдвигаемых физикой сверхвысоких энергий, особенно в области упругих взаимодействий. Однако устройства, построенные по этому принципу не в состоянии решить целый ряд принципиально важных задач ядерной физики (новые частицы, тяжёлые антиядра и др.).

Определим основные задачи ускорительной техники на сегодняшний день:

1. Повышение кинетической энергии ускоряемых частиц.
2. Повышение интенсивности ускоряемых сгустков частиц.

Повышение кинетической энергии ускоряемых частиц важно во всем диапазоне исследуемых энергий взаимодействия. Поэтому большие работы в этом направлении ведутся при разработках прямых методов ускорения (диапазон низких энергий). Сейчас уже техника этого направления располагает тандем - ускорителями на энергию до 1 GeV и более. Здесь основные проблемы, ограничивающие энергию этого диапазона, связаны с разработкой высоковольтных систем питания. (Электростатических генераторов, секционированных трансформаторов, каскадных систем). Основные проблемы: изоляционные материалы и борьба с утечками заряженных поверхностей. Несмотря на то, что ускорительные устройства прямого типа в общем развитии ускорительной техники занимают довольно значительное место (из общего числа ускорительных установок мира, 2000 единиц, 70% принадлежит этому типу), мы на них подробно останавливаться не будем. На рис. 5 в виде блок-схемы представлена картина проблем, связанных с решением основных задач ускорительной техники на сегодняшний день. Проблемы эти связаны с увеличением кинетической энергии и повышением интенсивности сгустков ускоряемых частиц. Существует три основных направления получения эффекта сверхсильных взаимодействий:

1. Создание суперускорителей.
2. Создание установок со сталкивающимися пучками.
3. Расширение программы космических исследований в области физики высоких энергий.

Создание ускорителей на сверхвысоких энергии (с неподвижной мишенью) идёт по следующим направлениям:

а) Для ускорения протонов строятся и проектируются каскадные синхротроны со стадийным ускорением частиц и плазменные ускорители (СССР, США, ЦЕРН).

б) Для ускорения электронов (и в ряде случаев для протонов) помимо синхротронов и ускорителей с пространственной орбитой ($\underline{H} = \text{const}$; $\overline{f} = \text{const}$), строятся гигантские линейные ускорители на энергию от единиц Гэв до 40-60 Гэв (например, Стенфордский линейный ускоритель "Монстр").

в) Для ускорения тяжёлых частиц создаются специальные ускорители типа Омнитрон (США, Беркли), который позволяет получать тяжёлые частицы с энергией 400 Мэв/нуклон для всех ионов с $M \leq 40$ и не менее 15 Мэв/нуклон для ионов с $M \leq 129$.

г) Разработка новых методов ускорения частиц (например, стохастический способ и когерентное ускорение).

2. Оригинальным направлением является разработка методов сталкивающихся пучков (подвижная встречная мишень). Этот метод позволяет получить сверхсильные взаимодействия в центре масс. Очень коротко о методе. Известно, что в ускорителях с неподвижной мишенью трудно получить большую угловую расходимость при сильном взаимодействии, так как основная часть энергии налетающей частицы тратится на движение общего центра инерции и только малая часть на относительное движение взаимодействующих частиц. Интересен с этой точки зрения график рис.6 а) который иллюстрирует потерю энергии (в %) на преодоление инерции центра масс при движении.

При методе сталкивающихся пучков, взаимодействие происходит в центре масс, при этом движение взаимодействующих систем в задачу эксперимента не входит. Это очень удачный способ избежать больших потерь энергии при переходе из лабораторной системы в систему центра инерции. При таком взаимодействии в системе центра масс возникают огромные энергии взаимодействия, для получения которых в ускорителях с неподвижной мишенью нужно было бы иметь частицы с энергией в десятки и более раз большие, чем энергии сталкивающихся пучков.

Энергия соударения в релятивистском случае (в пределе)

$$E_{\text{Lab}} = \frac{2E^2}{mc^2}$$

Например, чтобы получить $e-e$ взаимодействие при эквивалентной энергии 70 Гэв (ускоритель с неподвижной мишенью), по методу сталкивающихся пучков, необходимо иметь энергию взаимодействующих пучков всего 180 Мэв.

На рис.6 б) представлен график соответствия энергии сталкивающихся пучков с эквивалентной энергией ускорителей с неподвижной мишенью для взаимодействий $e-e$; $p-p$; $e-p$.

Несмотря на, казалось бы, огромные преимущества установок со сталкивающимися пучками частиц, проблема строительства суперускорителей остается острой. Дальнейшее изучение структуры материи невозможно без ускорителей с неподвижной мишенью. Именно та небольшая часть энергии " остающаяся " от преодоления инерции центра масс и является той причиной, которая вызывает множественное рождение новых частиц. А это единственный путь вглубь атомного ядра. Как для суперускорителей, так и для ускорителей сталкивающихся пучков, есть большое количество проблем, связанных с накоплением частиц, с построением инжекционных устройств. Для

второго типа ускорителей решающую роль при обеспечении эффективности проведения физического эксперимента, является плотность взаимодействующих пучков или иначе проблема "прозрачности" подвижной мишени. От этого зависит вероятность рождения событий и время эксперимента, которое ограничено временем жизни накапливаемых пучков.

3. Изучение потоков частиц, рождаемых в результате взаимодействий космических объектов является не менее важным направлением в физике высоких энергий. Перспективы развития этого направления, состоят в использовании достижений человечества в области освоения околоземного космического пространства. Физика изучения космического пространства. Физика изучения космических лучей - этой информации о естественных процессах проявления материальной сущности вселенной, должна выйти за пределы земной атмосферы. Это обстоятельство рождает немало проблем, связанных с методикой исследования и построения регистрирующих устройств с учётом особенностей проведения эксперимента. Вопросы обработки информации и управляемых программ эксперимента является такими же острыми, как и для двух предыдущих направлений. На рис.5 приведены наиболее актуальные проблемы, являющиеся общими для всех трёх направлений:

1. Разработка совершенных систем автоматического управления, и систем оптимизации режимов.

2. Создание электронной аппаратуры с малым временем разрешения.

3. Создание систем высокоскоростной обработки информации в связи с предполагаемым увеличением объема информации.

4. Разработка мощных систем ввода и вывода частиц при

весьма жёстких требованиях на быстроедействие и стабильность повторяемости от цикла к циклу параметров управляющих систем. Уже сейчас нужны мощные системы наносекундного диапазона для ускорителей сталкивающихся пучков и накопителей. Например, необходимы генераторы импульсов: $P_{\text{имп}} \sim 100 \text{ Мгватт}$ с фронтом нарастания $1 \cdot 10^{-9}$ сек. Точность синхронизации такого же порядка.

5. Создание высокоэффективных и экономичных систем сепарации частиц.

6. Радиационная защита персонала обслуживающего физический эксперимент. Экранировка.

7. Резкое снижение роли субъективного фактора в вопросах настройки и нормальной эксплуатации ускорителей.

Вопросом разрешения этих проблем было уделено достаточно внимания в предыдущем изложении материала, в связи с чем нет необходимости ещё раз останавливаться на этом. На том же рис.5 отражены проблемы, связанные с повышением интенсивности сгустков ускоряемых частиц. Необходимость в больших токах ускоряемых частиц вполне очевидна. Увеличивая вероятность рождения тех или иных физических явлений в процессе взаимодействия, мы тем самым повышаем точность измерения, сокращаем время набора статистического материала и увеличиваем объём информации. С увеличением плотности взаимодействующих пучков ускоренных частиц существенно повысится эффективность метода сталкивающихся пучков и снизится требование на время жизни накапливаемых пучков. Борьба за интенсивность ускоренных пучков ведётся учёными и инженерами-ускорительщиками в течение всего времени существования ускорительной техники. Сложность этой задачи достаточно наглядно иллюстрируется графиком рис.7, на котором прерывистой линией обозначена область

достигнутых средних токов ускорителей по состоянию на 1967 г. Три основных направления существует в решении задачи по увеличению интенсивности.

1. Мощные инжекционные источники заряженных частиц.
2. Увеличение цикличности работы ускорителей.
3. Использование предварительных накопителей.

В каждом из этих направлений есть свои проблемы и, как правило, ищется оптимальное решение по всем трём направлениям. Дело заключается в том, что первое и третье направление ограничено действием объёмного заряда, второе - инерционностью магнитных систем. Кроме указанных проблем, увеличение интенсивности ставит перед разработчиками новые задачи в связи с тем, что

1. Конечная проводимость стенок камеры при больших плотностях тока ускоряемого сгустка приведет к образованию наведенных электрических полей, которые вызовут возмущение динамического движения частиц в процессе ускорения. Наведенные поля и потенциалы окажут существенное влияние на бетатронные колебания и смещение их частот в резонансные области, что вызовет дополнительные потери интенсивности.

2. Большие плотности сгустка (более $1 \cdot 10^{14}$ р/м) вызовут шунтирующее действие на резонансные системы высокочастотного питания ускорителя, что приведет к дополнительному расходу в/ч мощности.

Таким образом, эти проблемы в свою очередь заставят обратиться к услугам криогенной техники как для источников, так и для в/ч систем. Кроме того, сверхпроводимость видимо будет необходима и при создании сильных удерживающих и компенсирующих магнитных

полей. Задачи достаточно сложные, как в случае повышения кинетической энергии, так и увеличения плотности тока ускоряемых частиц. Нетрудно видеть, что в том и другом случае как обязательный элемент, без которого невозможна нормальная эксплуатация ускорителей, присутствует проблема создания совершенных систем автоматического управления и оптимизация режимов.

Это очевидный факт, с которым нельзя не считаться. Приведем ещё одну блок-схему (рис.8), иллюстрирующую необходимость серьёзных усилий в деле совершенствования систем управления.

Обобщая данные, изложенные выше, мы можем сформулировать следующие выводы:

1. С увеличением кинетической энергии ускоряемых частиц и повышением их интенсивности, возникают серьёзные инженерные проблемы, связанные с обеспечением нормальной эксплуатации сложных ускорительных комплексов в процессе проведения физического эксперимента.

2. Целесообразность строительства сложных устройств обеспечения физического эксперимента, в основном, будет определяться эффективностью использования ускорительных комплексов в свете задач, которые ставит перед собой физика высоких энергий.

3. Эффективность использования ускорителей будет зависеть от насыщенности фронта физических исследований, определяемого количеством, одновременно проводимых работ в широком диапазоне энергий в одном цикле ускорения.

4. Разнообразие методик физических исследований потребует создания универсальных программирующих устройств и систем автоматического управления ускорителей в многопараметрическом режиме.

5. Возрастающие требования к точностям измерений в процессе физического эксперимента (стабильность программного управления,

синхронизация, кондиция выводимых пучков большой энергии и др.) потребует создания многодатчиковых систем контроля, а систем оптимального выбора предпочтительного режима (с учётом реального состояния регулируемого объекта) при решении заданной функциональной задачи.

6. Системы программирования, управления и автоматической оптимизации режимов потребуют широкого применения функциональных регистрирующих устройств и вычислительных машин дискретного и непрерывного действия.

7. Настройка и нормальная эксплуатация ускорительных комплексов не должна зависеть от субъективных факторов, определяемых квалификацией и опытом оператора. Функции оператора должны быть ограничены: программированием задач физического эксперимента, управлением программой контроля состояния регулируемого объекта и организацией работ при возможных аварийных состояниях оборудования.

8. Автоматизация и оптимизация управления должна идти по пути создания самонастраивающихся систем (дифференциальных или экстремальных систем, или в необходимом их сочетании).

9. Наличие автоматических систем регулирования при оптимизации режимов физического эксперимента позволит: 1) высвободить из эксплуатации квалифицированные кадры инженеров-ускорительщиков, усилия которых могут быть сконцентрированы на совершенствовании действующих систем и на решении новых задач, возникающих перед ускорительной техникой, 2) создать безопасные условия для работы персонала обслуживающего весь комплекс обеспечения физического эксперимента, 3) повысит надёжность и устойчивость режимов исследований, 4) снизит эксплуатационные расходы, 5) позволит решать сложные задачи физического эксперимента с

минимальной затратой времени на настройку и регулировку режимов обеспечения, что приведет к существенной экономии расхода энергии в процессе подготовки эксперимента.

10. Будущее ускорителей во многом зависит от степени математизации управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Настоящий обзор составлен на основе материалов, опубликованных за три последних года в отечественной и иностранной литературе по электронной и ускорительной тематике. Просмотрено около 90 работ. Автор оставляет за собой право внесения дополнительных данных, появившихся в печати за последнее время, в следующем отчете.



/Казанский Г.С./

" 11 " сентября 1968 г.

СПИСОК ПРОСМОТРЕННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. "Атомная техника за рубежом", 1963, № 7, с 42-43
2. "Атомная техника за рубежом", 1963, № 8, с 34-37
3. "Атомная энергия", 1964, т.16 в.1, с 9-11
4. "Атомная энергия", 1963, т.15 в.6 с 528-530
5. "Атомная техника за рубежом", 1961, № 2, с 14-16
6. "ПТЭ" 1963 № 4 с. 22-23
7. "Украинский физический журнал", 1963 т.8, № 8, с.861-876.
8. "ЖТФ", 1963 т.33 в.9, с 1116-1120
9. ЖТФ, 1963 т.53 в 10, с 1227-1120
10. "Радиотехника", 1963 т.18 № 9, с 3-12
11. "УФН" , 1963, т.81, вып.1, с 7-50
12. "Атомная энергия", 1963 т.15 в 6, с 528-530
13. "Атомная техника за рубежом", 1961, № 2, с 14-16
14. "Природа", 1964, № 1, с 44-56
15. УФН, 1964, т.82 в.2, с 287-323.
16. "Атомная техника за рубежом" 1964 № 4, с 3-12
17. "Атомная техника за рубежом", 1964, № 6, с 3-8
18. "Атомная энергия", 1965 т.18, № 6, с 631-638
19. "Атомная энергия" 1965, т.18, № 1, с 559-565
20. "Атомная энергия", 1964 т.17, вып.1, с 57-58
21. "Атомная техника за рубежом", 1964 № 8, с 13-15
22. "Атомная энергия", 1964, т.17, вып.2, с 88-93
23. "Известия ВУЗ", "Физика", 1964 , № 5, с 111-114; 96-98
24. "Атомная энергия", 1964, т.17, в.4 , с 316-318
25. "ЖТФ", 1964, т.34, № 10, с 1867-1870.

26. "Атомная техника за рубежом", 1964, № 16, с 22-29.
27. "ПТЭ", 1964, № 5, с 36-40
28. "Атомная энергия", 1965, т.18, № 1, с 58-59, 22-28
29. "ЖТФ", 1965, т.35, вып.4, с 612-617
30. "Атомная энергия", 1965, т.18, вып.3, с 209-213
31. "ЖТФ", 1965, т.35, вып.4, с 630-634
32. "Атомная энергия", 1965, т.19, вып.6, с 497-498
33. "Атомная энергия", 1966, т.20, вып.2, 182-185
34. "Атомная энергия", 1966, т.20, вып.3, с 220-223
35. "Атомная энергия", 1966, т.20, вып.4, с 366-367
36. "ЖТФ", 1966, т.36, вып.5, с 936-941.
37. "УФН", 1966, т.88, вып.4, с 735-749
38. "УФН", 1966, т.88, вып.4, с 725-734
39. "Вестник АН СССР", 1966, № 4, с 30-43, 122-129
40. "Атомная энергия", 1966, т.20, вып.5, с 385-392
41. "Атомная техника за рубежом", 1966, № 6, с 8-11
42. "Атомная энергия", 1966, т.20, вып.6, с 513-514
43. "Атомная техника за рубежом", 1968, № 5, с 3-7
44. "Атомная энергия", 1968, т. 24, вып.5, с 487-488

5. Amer. J. Phys 1963 v 31 n°6 p 409-416
6. Brit. J. of Appl Phys 1963 v 14 n°6 p 317-318
7. Science 1963 v 140 n°3570 p. 958-959
8. Meth., 1963 v 23, n°2, p. 225-230
9. L'onde Electz. 1963 t 43, n°435, p 651-661
10. IEEE Trans. 1963, v ED-10, n°3, p 195-200
11. Brit. J. Radiol. 1963. v 36, n°429, p 650-659
12. Science, 1963 v 141, n°3582, p 679-686
13. Phys. Today, 1963, v 16, n°9, p 46-52
14. Nucl. Instr. & Meth. 1963. v 24, n°1, p 74-76
15. Science, 1963, v 142, n°3589, p 271-285; 178-184
16. Nucleonics 1963 v 21 n°11 p 56-61
17. Rev. Sci. Instr. 1963, v 34, n°12 p. 1323-1327
18. Nucl. Instr & Meth 1963, v 24 n°4 p 399-407
19. Rev. Sci. Instr. 1964. v 35 n°1 p 1-11
20. Nucleonics Instr & Meth 1964 v 25 n°2, p 189-196
21. "Progress in Nuclear physics" v 9 p 71-116
22. IEEE Trans. on Nucl. Science, 1964, v N3-11, n°1, p 58-65
23. Rev. Sci. Instr. 1963 v 34 n°11 p 1196-1199
24. Czech J. Phys. 1964, t 14. Sect. A. n°3, p 158-166
25. Proc. Roy. Soc., Ser. t A 1964, v 278, n°1374 p 439-451
26. Rev. Sci. Instr. 1964 v 35, n°5, p 624-625
27. Sci. News Lett 1963 v 84, n°24 p 372
28. The Scenna internationale conference on elementary particles. 30 sept 5 oktober 1963 v 2 p 151-169
29. Nucl. Instr. and Meth, 1964 v 28 n°1 p 1-9, 55-59
30. Nucl. Instr and Meth 1964 v 28 n°1 p 148-153
31. Nucl. 1965 vol 23, n°6 p 50-54

- 72. Nucl. Instr and Meth 1964 v28 n1 p 10-15
- 73. J Appl Phys 1965 vol 36 No 6, p 2092-2094
- 74. Nucl. Instr and Meth. 1965 vol 34, No 2 p 229-234
- 75. Sci. News Lett, 1965, vol, 87, No 19 p 295
- 76. Nucl. Instr and Meth. 1964 v 28, No 2, p 353-354
- 77. IEEE Internat. Convention. Record 1964, pt-2-p55-58
- 78. IEEE Tras, on Nucl. Sci. 1964 v N3-1 N4 p 17-23-27
- 79. Rev Sci Instr. 1964 v 36 N10 p 1283-1288
- 80. Nucleus 1964 t5 n5 p. 44-49; 356-363
- 81. Phys Today 1964 v17, n11. p 42-48
- 82. Nucleonics 1966 v 23 n2, p 109
- 83. New Sci. 1965 v 25 N433, p 578
- 84. Science 1965, v 147, No 3164, p 1423-1425
- 85. J. Appl. Phys 1965, v 36, n4, p 1314-1319
- 86. Science, 1965 v 148 N3677, p 1571-1575
- 87. Phys Lett 1965 v17 n2 p 160-162
- 88. IEEE Transactions 1965 N3-12 No 3 p 1-1073
- 89. Appl Atomic 1965, n534 p 2-3
- 90. OXFORD Internationale. conf. on elementary particles, sept 1965. Proceeding p 13-16
- 91. Phys Today 1966, vol 19. No 6 p 81-803
- 92. u gr.

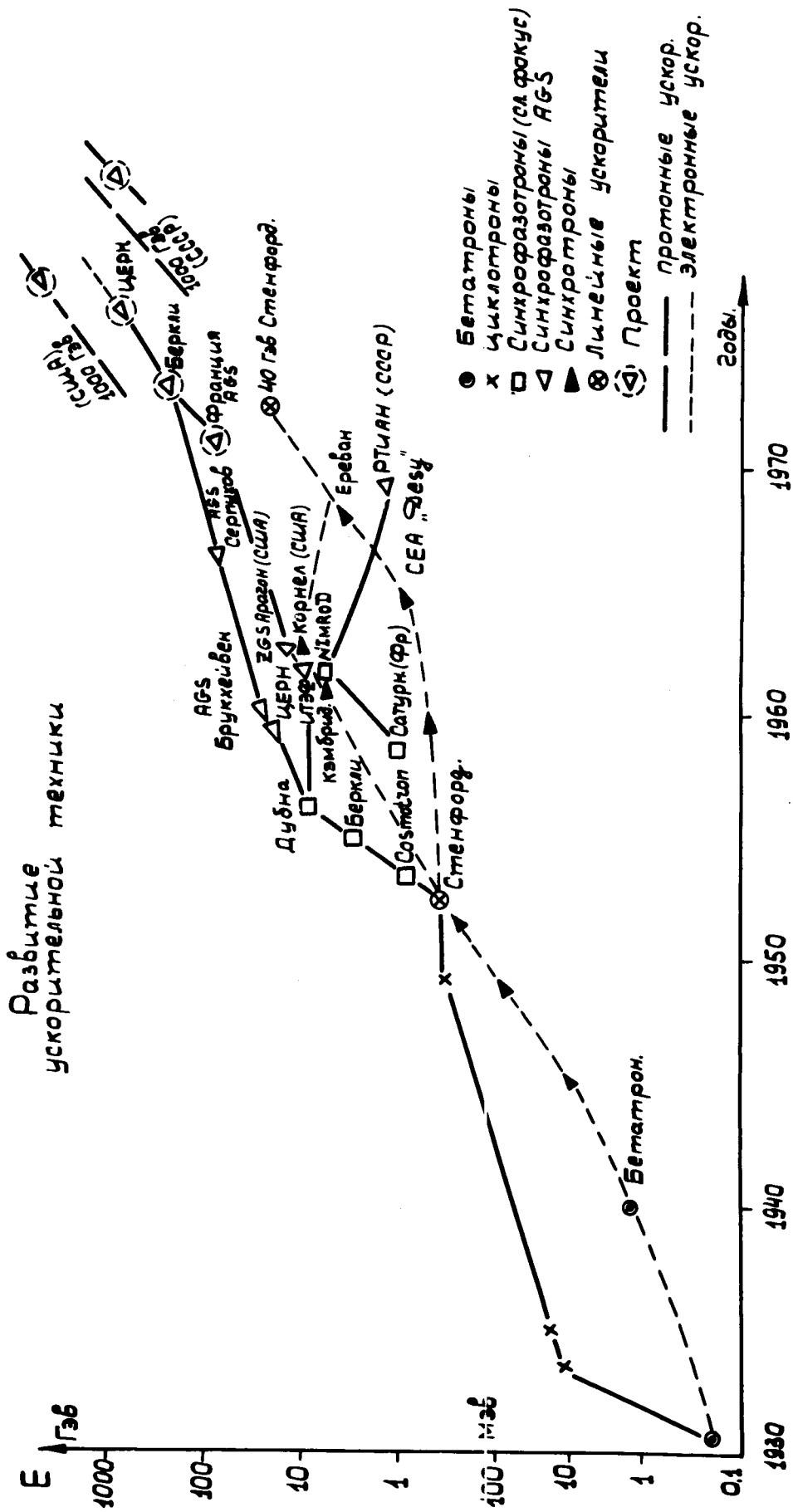
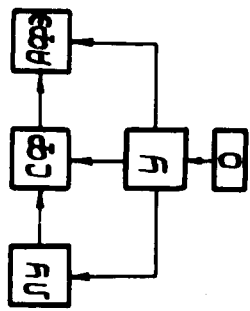


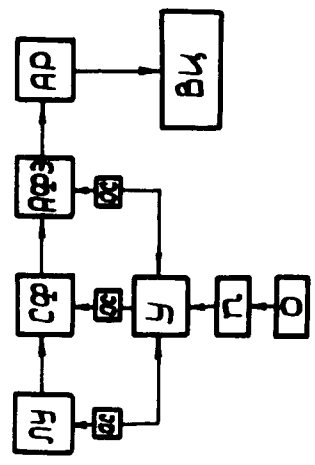
Рис. 1

Модификация управления

а)

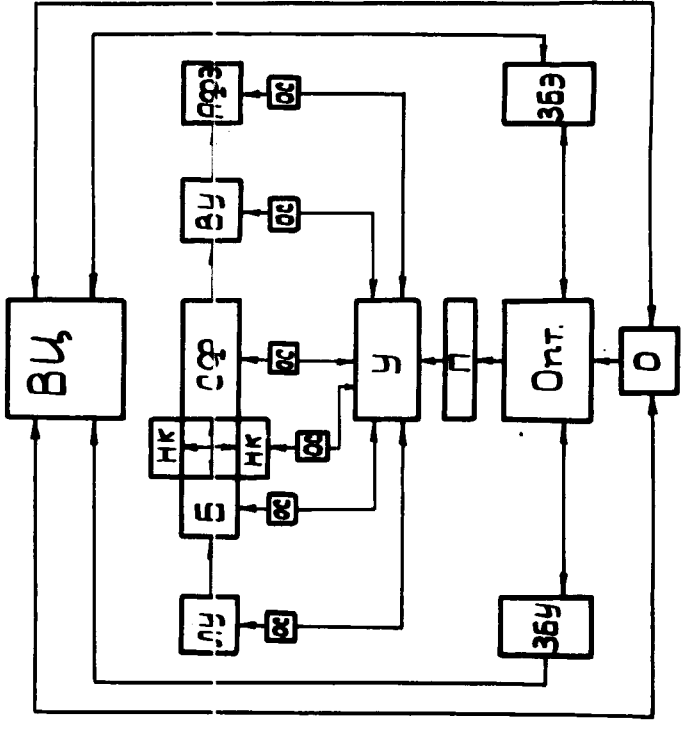


б)



Обозначения:

- ЛУ - Линейный ускоритель
- СФ - Синхрофазотрон
- АФЭ - Аппаратура фазического эксперимента
- У - Управление
- О - Оператор
- ОС - Обратная связь
- П - Программатор
- АР - Автоматический регистратор
- ВЦ - Вычислительный центр
- Б - Бустерный ускоритель
- НК - Накопительное кольцо
- ВУ - Выводное уст-во
- ОПТ - Оптимизатор
- ЗБУ - Задающий блок ускорит.
- ЗБЭ - Задающий блок эксперимента



б)

Рис. 2

Стоимость ускорителей
в зависимости от энергии.

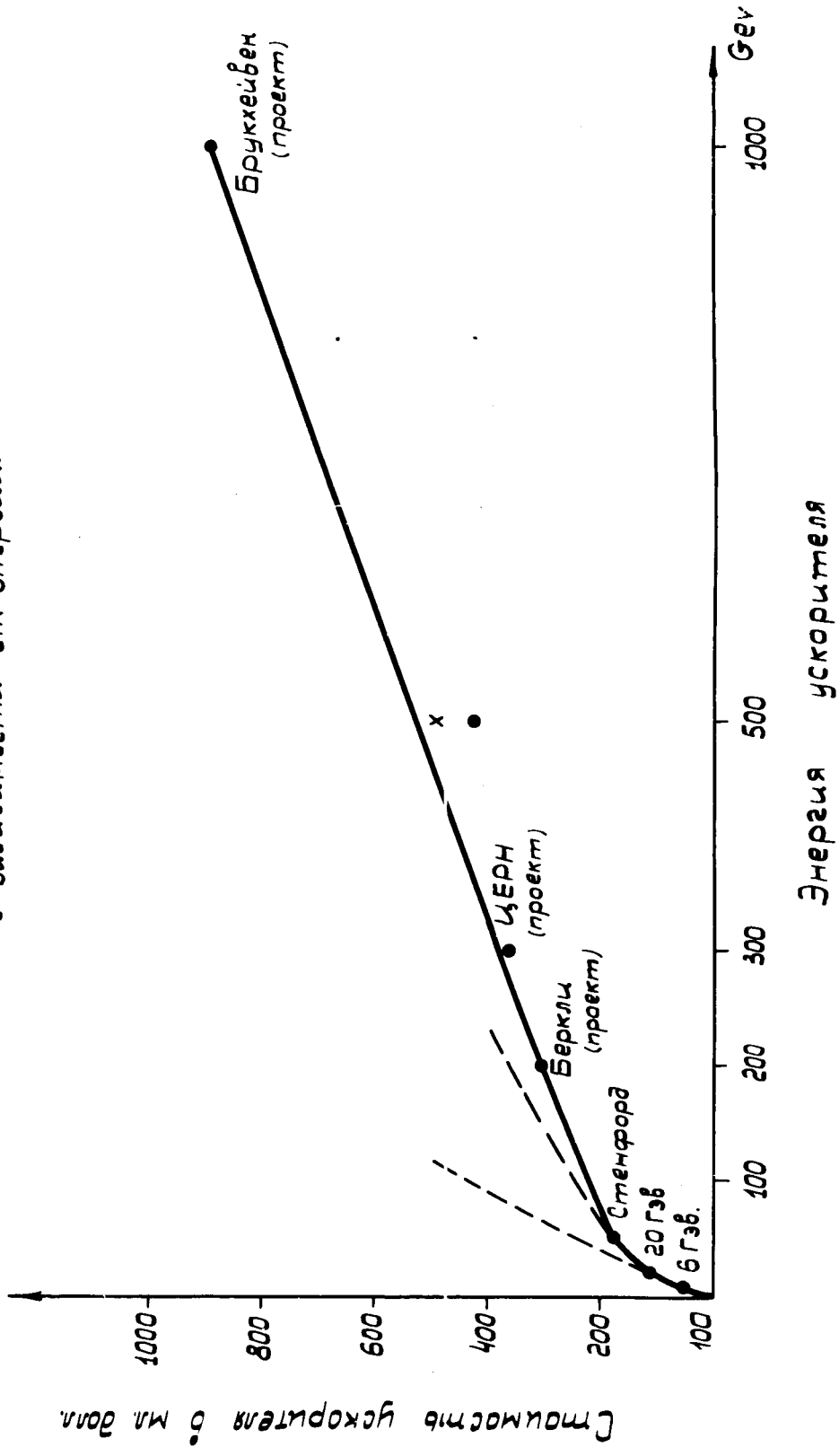
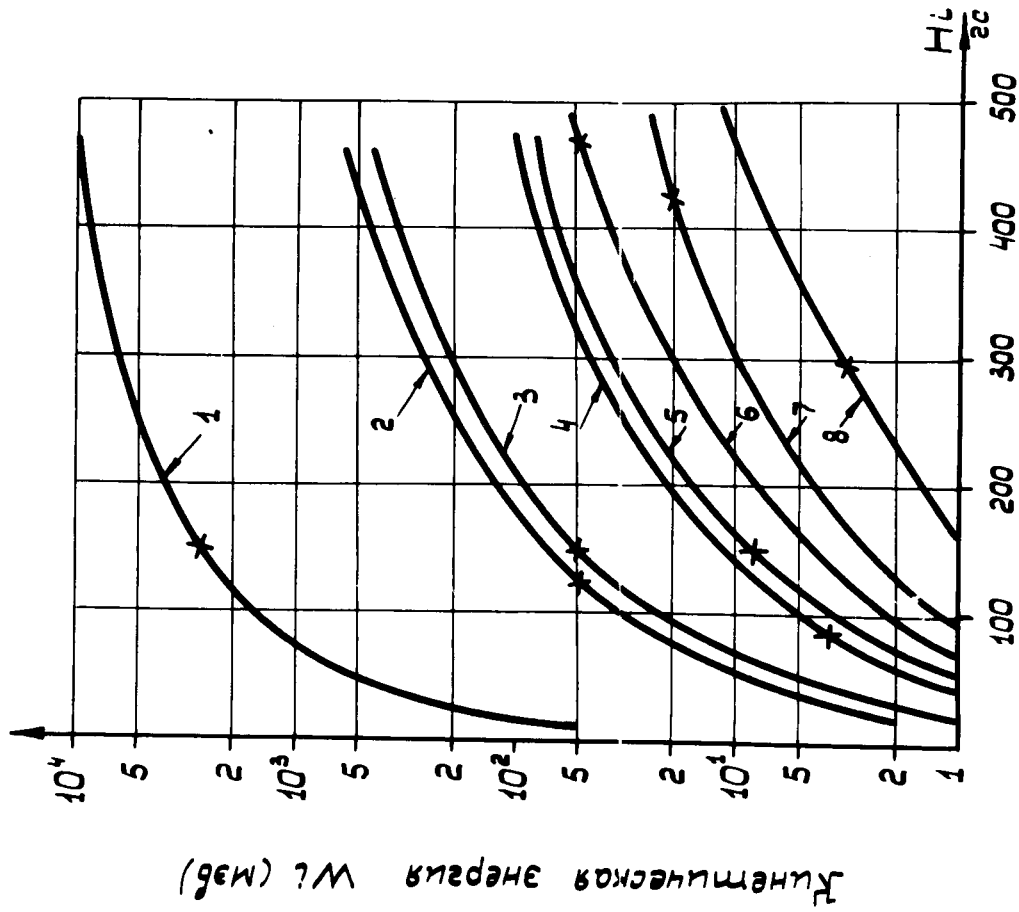


Рис. 3

График зависимости $W_i = f(H_i)$



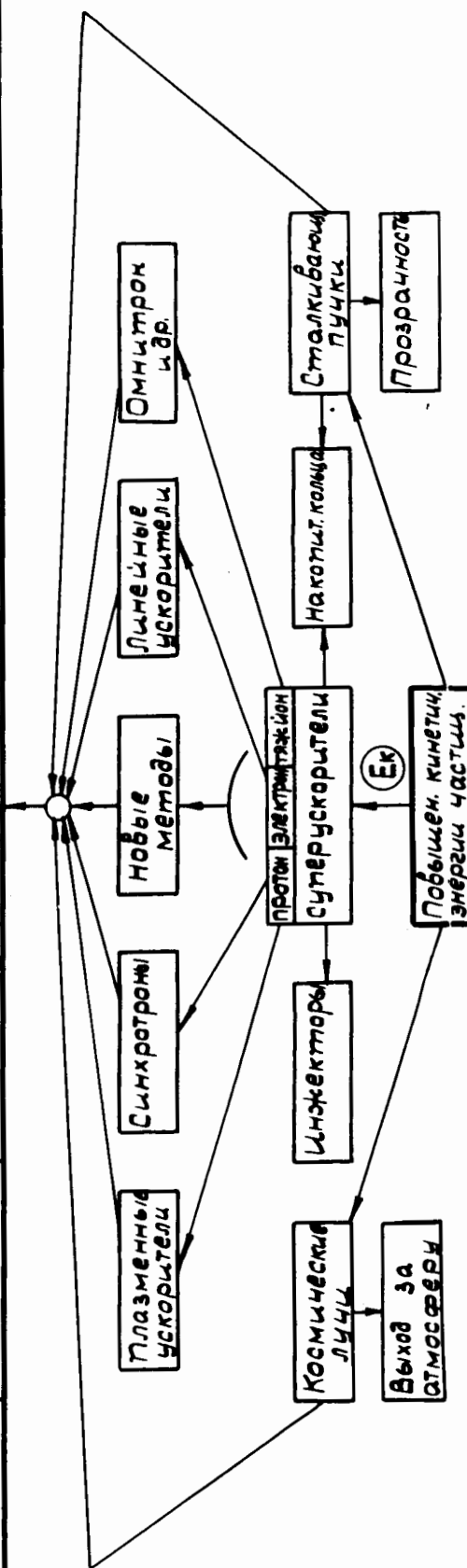
1. Ускоритель 300 ГэВ
2. Ускоритель АС (ЦЕРН) 28 ГэВ
3. Ускоритель СРС
4. Ускоритель ИТЭФ 7 ГэВ
5. Синхрофазотрон (Дубна) 10 ГэВ
6. Ускоритель ЗБС 7 ГэВ
7. Беаатрон
8. Космотрон.

Поле инжекции

Рис. 4

Проблемы.

Защита	Ввод и вывод ускоренных частиц	Разрешающее время регистрирующих устройств и оптимизация режимов	Автоматическое управление и оптимизация режимов	Скорость обработки информации	Сепарация частиц	Эксплуатация
--------	--------------------------------	--	---	-------------------------------	------------------	--------------



Проблемы.

Системы точной регистрации процессов	Сверхпроводимость	Удерживающие поля	Автоматическое управление и оптимизация	Объемный заряд	Проводимость стенок камеры	Нагрузка ускоряющих систем
--------------------------------------	-------------------	-------------------	---	----------------	----------------------------	----------------------------

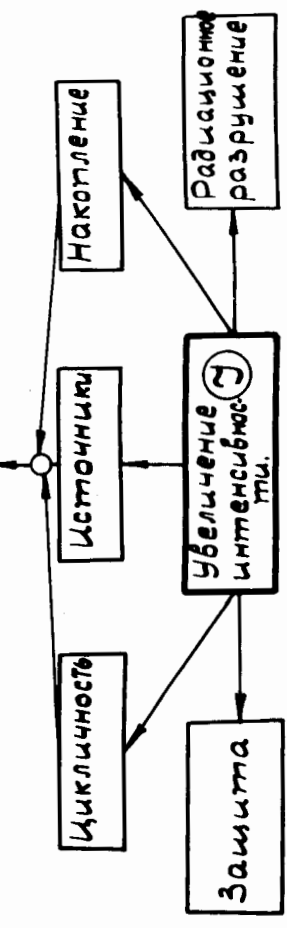
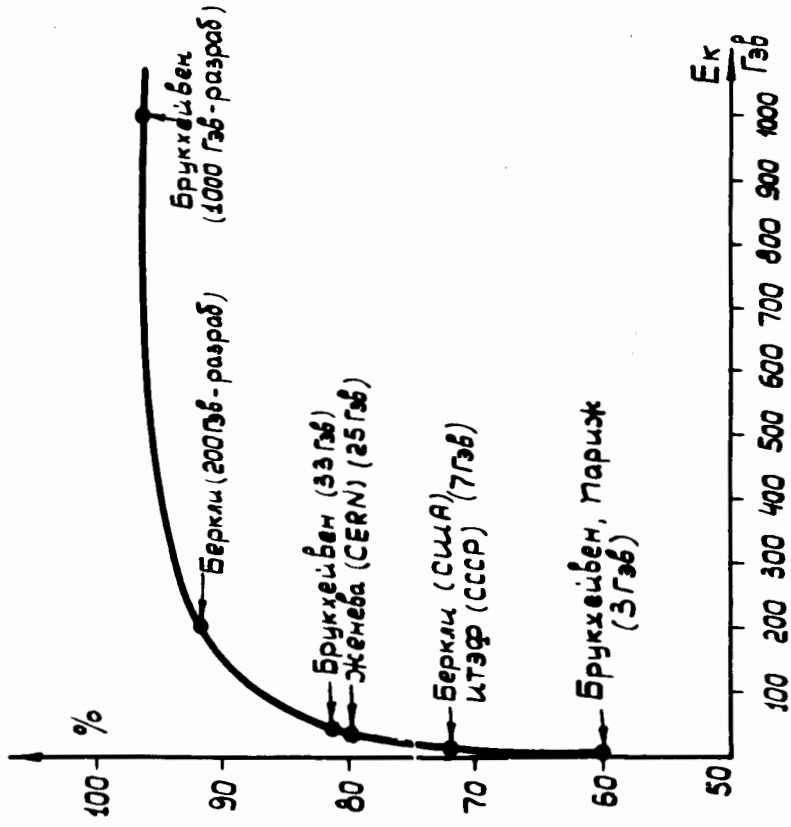
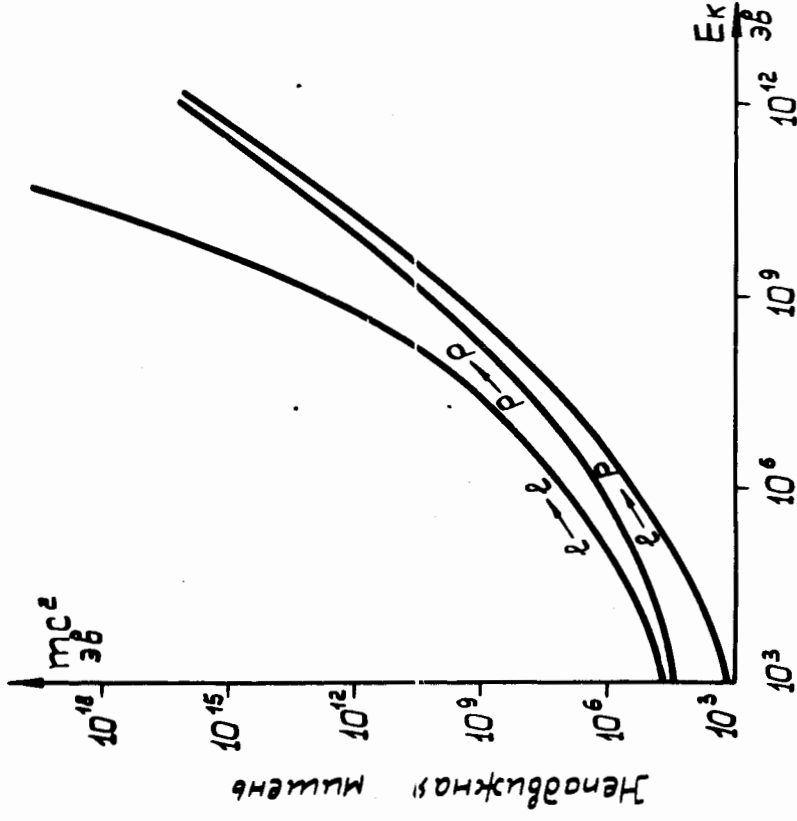


Рис. 5

а) График потерь энергии на преодоление инерции центра масс



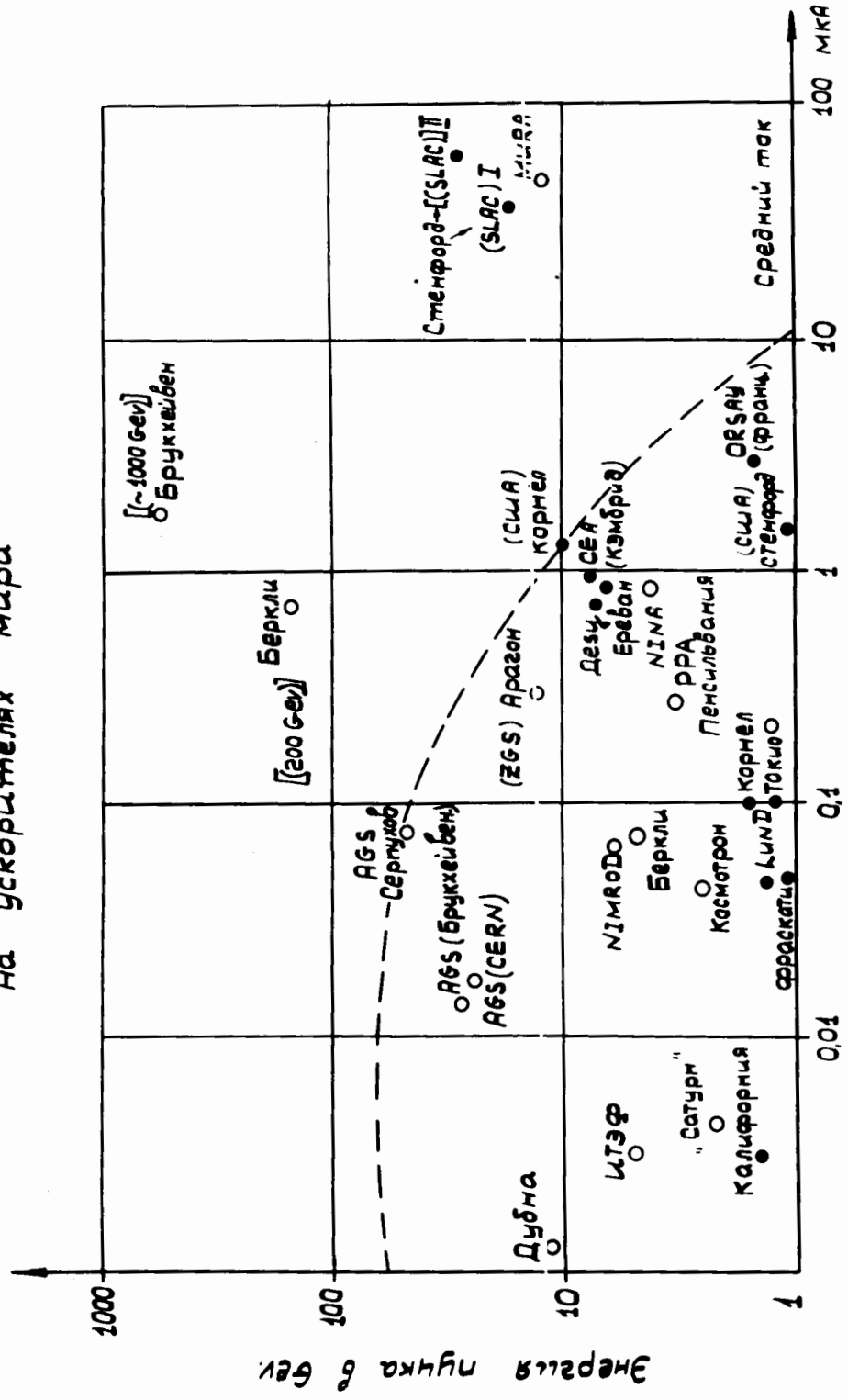
б) График зависимости $E_{н.м.} = f(E_{ст.})$



Встречные пучки.

Рис. 6

Средний ток ускоренного пучка
на ускорителях мира



о-протонные ускорит.; ●-Электронные ускорит.; [] - проект; --- по состоянию на 1967г.

Рис. 7.

Блок - схема необходимости.

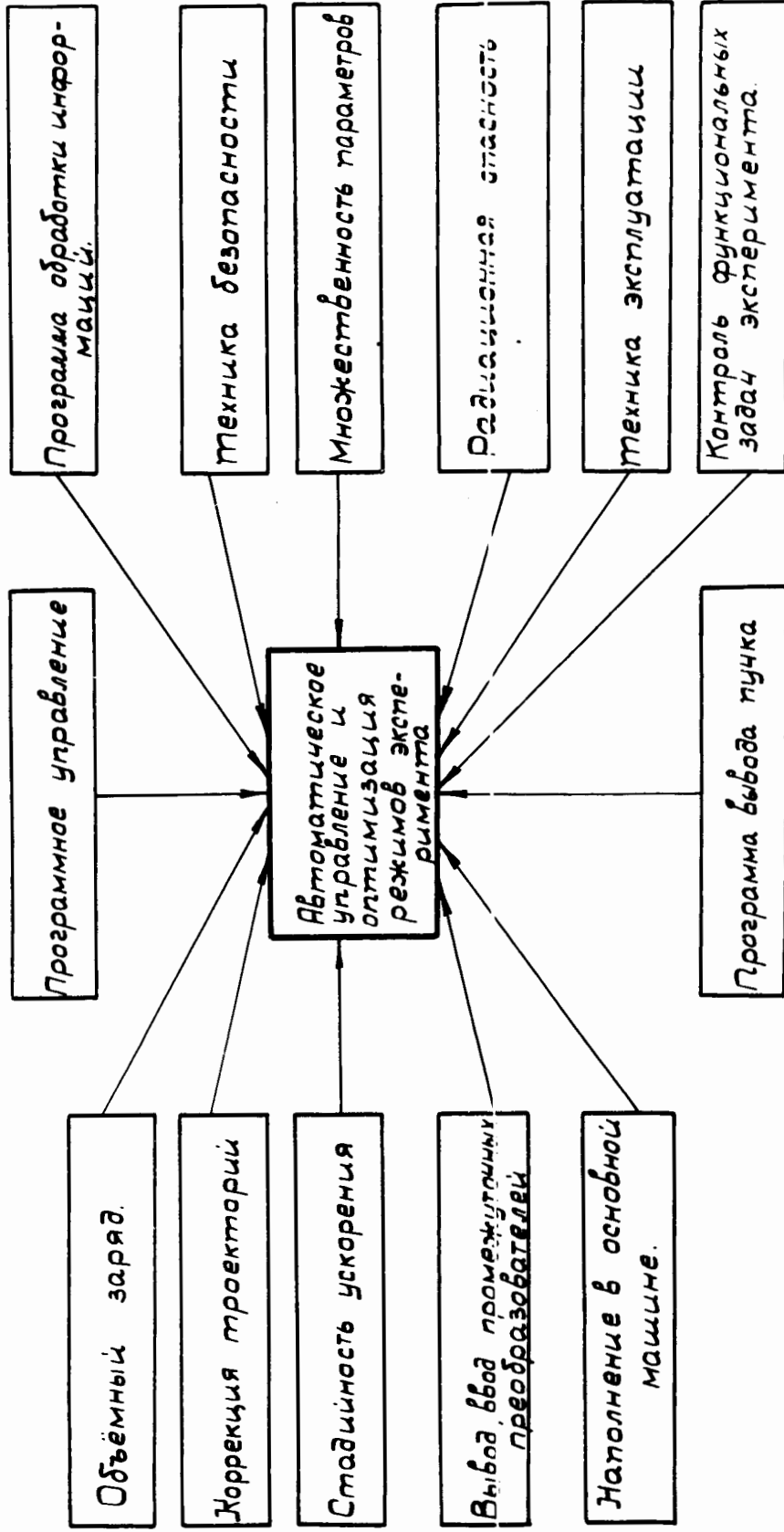


Рис. 8.