



**ЭВМ**

**В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ  
ФИЗИКЕ**



1968 г.



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ

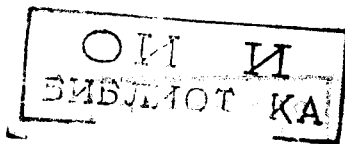
10 - 4269

Е. П. Кузнецов \*

О ПРОЕКТЕ  
ПРОПАН-ФРЕОНОВОЙ КАМЕРЫ "СКАТ"

Лекция, прочитанная в Школе СИЯИ по применению электронных  
вычислительных машин в задачах экспериментальной физики

г. Алушта, Крым, СССР, 5-19 мая 1968г.



---

\* Институт физики высоких энергий, г. Серпухов

Дубна 1968

Широкое внедрение электронных вычислительных машин в различные звенья физического эксперимента за последние годы вызвало определенный интерес со стороны физиков-экспериментаторов к вопросам вычислительной техники и программированию. Персонал физических лабораторий при подготовке экспериментов или обработке экспериментальных данных вынужден (в большинстве случаев самостоятельно) осваивать технику ЭЕМ и методы работы на вычислительных машинах.

При всем многообразии материала как по самим вычислительным машинам, так и по вопросам программирования, в процессе такой работы возникают естественные трудности, связанные, главным образом, с ограниченностью литературы, рассчитанной на физика-экспериментатора или на лиц, занимающихся развитием методических вопросов экспериментальной физики. Если учесть при этом, что методика использования ЭВМ в экспериментальной физике быстро совершенствуется, то будет понятен интерес со стороны физических институтов к летней школе Объединенного института ядерных исследований - "Применение ЭВМ в задачах экспериментальной физики".

Школа проводилась Лабораторией вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ (директор - член-корреспондент АН СССР проф. М.Г.Мещеряков) в г.Алушете (Крым) с 5 по 19 мая 1968 года.

Программа школы наряду с основополагающими вопросами включала также лекции по некоторым конкретным современным методикам. Для чтения лекций были приглашены ведущие специалисты из Объединенного института ядерных исследований, институтов стран-участниц ОИЯИ, а также коллеги из европейских исследовательских центров - ЦЕРНа (Швейцария) и Сакле (Франция).

Не имея возможности опубликовать весь материал, ректорат Школы подготовил к изданию отдельные лекции, сохранив, в основном, их в том виде, в котором они были представлены авторами.

Лица, интересующихся лекциями в полном объеме, мы адресуем в библиотеку ОИЯИ, где находится полный сборник прочитанных в школе лекций: "Применение ЭВМ в задачах экспериментальной физики".

Ректор Школы  
доктор технических наук

Г.ЗАБИЯКИН

Отпечатано методом ксерокс-роупринт с материалов, подготовленных ректоратом Школы.

В настоящее время в различных лабораториях мира проектируются и создаются пузырьковые камеры с водородным и пропан-фреоновым заполнением, объем которых существенно больше работающих ныне (см., например, /1,2/).

Создание многокубовых пузырьковых камер ставит ряд серьезных проблем обработки информации, которая будет получена на таких камерах. Эти проблемы возникают прежде всего из-за трудностей, связанных с фотографированием больших объемов, что вынуждает применять сложные многообъективные системы.

Рост энергии первичных частиц и специфика фотографирования треков в камере с относительно малых расстояний (как это имеет место в камерах "Мирабель" и "Гаргамель") значительно усложняют вид события, затрудняют его поиск и идентификацию, что приведет, в конечном итоге, к значительному увеличению времени измерения и росту времени, затрачиваемому на вычислительных машинах.

Оценки, проведенные в разных лабораториях /3/, показывают, что время, затрачиваемое на обработку одного события, полученного в больших камерах на просмотрной аппаратуре, займет не менее 15-25 минут, а время обработки события на вычислительной машине класса СДС-6600 составит 2-3 минуты.

Эти оценки показывают, что массовая обработка большого количества фотоснимков с таких камер требует создания значительного парка качественно новых просмотрно-измерительных инструментов, работающих "в линии" ЭВМ, и мощной вычислительной базы.

Все это говорит о необходимости при конструировании больших камер уделять должное внимание вопросам будущей обработки информации, а также выбору конструкции камеры, максимально упрощающей систему фотографирования и позволяющей добиться высокого качества изображения треков.

В лекции доктора Левека /3/ проанализированы многие вопросы, возникающие при обработке фотографий с больших камер, в частности, с камер "Мирабель" и "Гаргамель". В данном сообщении будут, в основном, затронуты вопросы, характерные для камеры "СКАТ".

#### Общие соображения по выбору параметров камеры

Институтом физики высоких энергий (г.Серпухов) совместно с Институтом электрофизической аппаратуры им.Ефремова (г.Ленинград) разработан проект пузырьковой камеры СКАТ объемом около 6000 литров. Камера будет работать на тяжелых жидкостях - фреоне и смесях пропана с фреоном.

При выборе объема и конструкции камеры принимались во внимание соображения, связанные как с физикой будущих исследований, так и с оптикой камеры, точностью измерений, проблемами просмотра и измерения снимков.

Основные соображения, определившие размеры рабочей области камеры, следующие:

Ядерный пробег в пропановой камере (наиболее легкий наполнитель) составляет  $\sim 1,5$  м. Эта величина и определяет, в основном, размеры камеры — следы первичных и вторичных частиц могут быть прослежены и обмеряны в среднем на таких или меньших расстояниях.

Кроме того, при больших энергиях существенно возрастают пролетные длины для нестабильных частиц. Учет этого обстоятельства приводит к необходимости увеличения размера камеры вдоль пучка на 1 — 1,5 метра. Таким образом, размер камеры по направлению пучка должен быть не менее 4 — 5 метров.

Поперечные размеры камеры могут быть выбраны в пределах 1 — 1,5 метра, если принимать во внимание угловые характеристики взаимодействий при энергиях 20 — 70 Гэв.

Для оценки эффективности использования камеры с размерами рабочей области 4,5 x 1,3 x 1,1 м<sup>3</sup> (выбранные размеры камеры СКАТ) при энергии первичных частиц до 70 Гэв, было проведено моделирование вида событий в камере методом Монте-Карло. Моделирование показало, что камеру с указанными размерами рабочей области можно эффективно использовать до предельных энергий ускорителя ИФВЭ.

На рис. I приведено, для примера, распределение поперечных координат (относительно продольной оси камеры) вершин вторичных взаимодействий ядерноактивных частиц, образованных  $\pi$  — мезонами с энергией 25 Гэв. При моделировании были выполнены следующие условия: ширина пучка первичных частиц

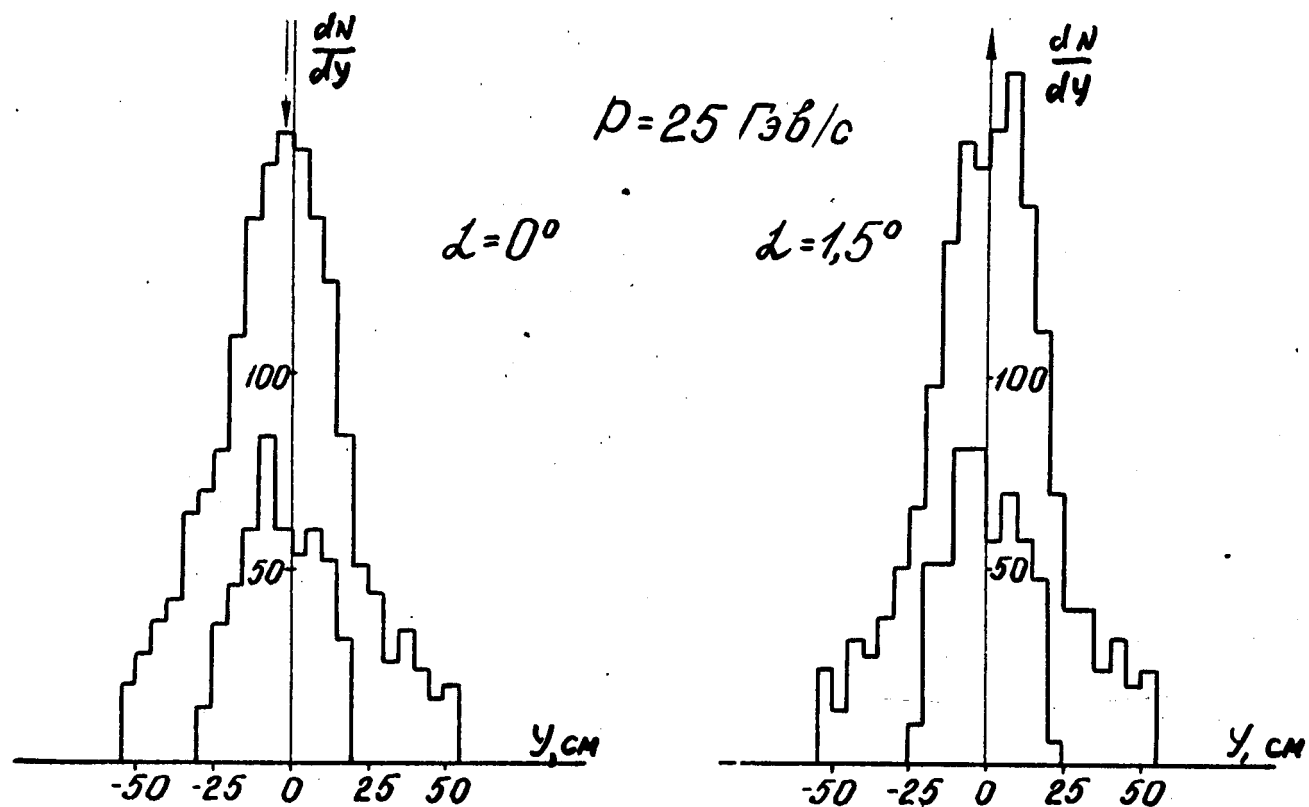


Рис. I. Распределение поперечных координат (относительно продольной оси камеры) вершин вторичных взаимодействий  $\pi$ -мезонов, образованных в пион-нуклонных соударениях при энергии 25 Гэв. (внутренняя гистограмма - распределение вершин первичных взаимодействий).  $\alpha$  - угол входа пучка в камеру.

в плоскости фотографирования - 40 см., ввод пучка частиц - под  $0^\circ$  относительно продольной оси; магнитное поле - 25 кгс. Анализ подобных распределений при разных начальных импульсах показал, что при энергиях 20 - 60 Гэв большинство ( $\sim 95\%$ ) вторичных частиц будут взаимодействовать в камере, что может помочь в идентификации частиц.

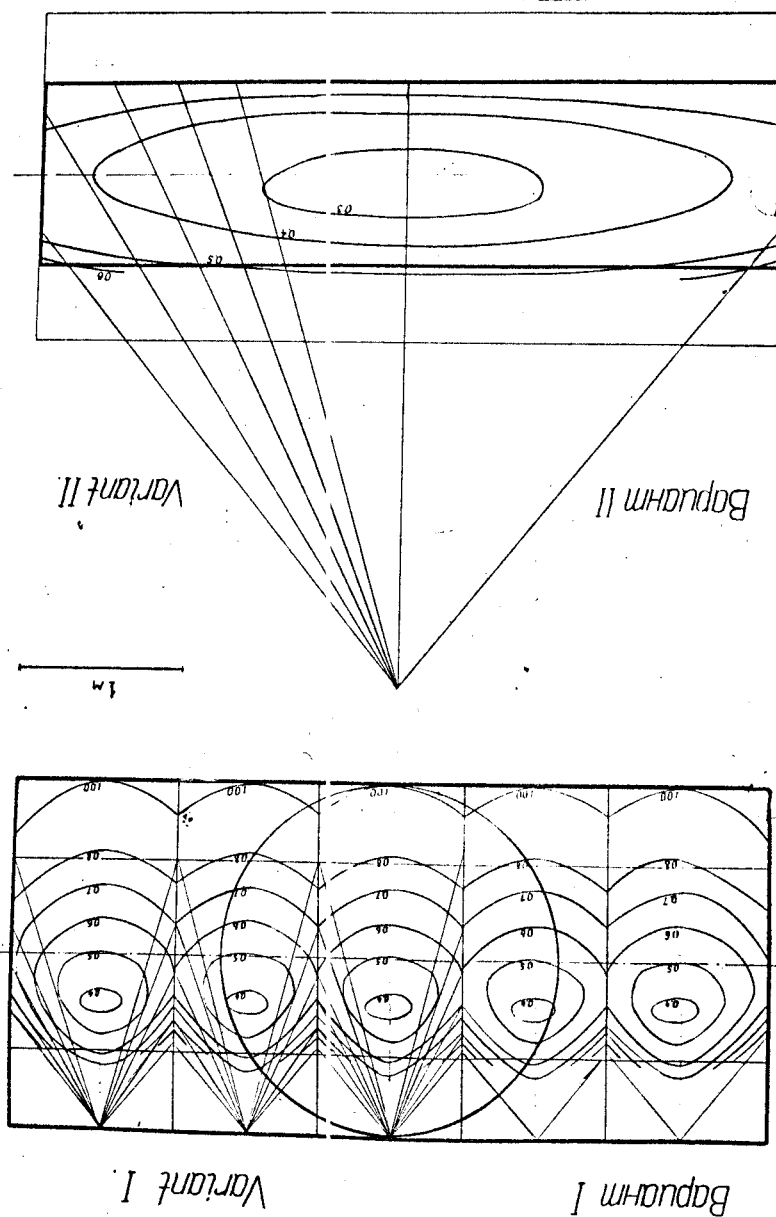
### Выбор схемы фотографирования

На выбор конструкции камеры существенное влияние оказывает выбор схемы фотографирования. Нами рассматривалось два варианта оптической схемы для камеры длиной 4,5 м и поперечными размерами 1 - 2 м. На рис. 2 представлены две возможные схемы фотографирования камеры. В конструкции, выполненной по первой схеме, фотографирование рабочего объема производится объективами, расположенными в непосредственной близости от рабочего объема камеры. Такая схема фотографирования принята в пропан-фреоновой камере "Гаргамель" /1/ и жидководородной камере "Мирабель" /1,2/. По второй схеме фотографирование производится объективами, удаленными на значительное расстояние от рабочего объема.

Первый вариант фотографирования камеры, несмотря на кажущуюся привлекательность (простота конструкции), обладает, на наш взгляд, рядом недостатков. Во-первых, в этом варианте необходимо использовать значительное количество объективов для фотографирования камеры - до 10 при полном угле



Рис. 2. Возможные схемы фотодирования камеры. Кривые раз-  
решения (в мм) рассчитаны для идеальной оптической системы.



зрения объективов -  $80^\circ$  (в камерах "Гаргамель" и "Мирабель" будет использоваться по 8 объективов, с полным углом зрения  $\sim 110^\circ$ , объединенных в группы, просматривающие весь рабочий объем камеры). Установка объективов в непосредственной близости к рабочему объему приводит к значительному изменению пространственного разрешения по объему камеры и сильной разномасштабности изображения (см. рис.2). Ядро электромагнита камеры затрудняет доступ к объективам, установленным на корпусе камеры. Это заставляет создавать чрезвычайно сложные системы оптической транспортировки изображения на расстояние до 2,5 метров. И, наконец, при такой схеме фотографирования будет значительно усложнен просмотр пленок и последующая обработка. Просмотр осложняется как большим количеством изображений (8 проекций, на которых видны различные части объема), так и сильными искажениями вида событий, вызванных разномасштабностью и значительным наклоном угла зрения объективов к направлению магнитного поля, что приведет в отдельных случаях к необычному виду траекторий заряженных частиц (вплоть до вида траекторий с переменной кривизной). Можно также отметить, что расположение объективов на корпусе камеры неизбежно приведет к потере для регистрации частиц части объема, расположенного вблизи объективов (до 20% - 30%).

Несмотря на перечисленные трудности и недостатки такой схемы фотографирования, в этом варианте несколько проще

решаются некоторые конструктивные вопросы, связанные с созданием сосуда значительных объемов, работающего под давлением. Поэтому первая схема фотографирования совершенно неизбежна при создании сверхгигантских камер на несколько десятков кубометров. Осуществление второй схемы фотографирования, когда часть объективов фотографирует весь объем со значительного расстояния, требует создания большого смотрового стекла, выдерживающего рабочее давление или осуществление разгрузки стекла противодавлением и т.п. Для камер объемом  $\sim 10 \text{ м}^3$  эта проблема может быть еще решена и, таким образом, осуществим классический способ фотографирования камеры.

В варианте, принятом для камеры СКАТ, фотографирование будет осуществляться четырьмя объективами через 2,6-метровый слой воды, которой заполнен "охранный" объем (рис.3). Рабочая жидкость камеры отделена от воды стеклом толщиной 100 мм. Два объектива фотографируют весь объем камеры и два - по половине рабочего объема. Фотографирование будет осуществляться через защитные стеклянные сферические колпаки толщиной 30 мм.

Некоторые характеристики объективов и фотограмметрических камер приведены ниже.

- Фокус объектива - 117,9 мм.
- Полный угол зрения объектива  $2\beta = 87^\circ$  (в воздухе).
- Дисторсия должна быть исправлена для переднего плана фотографирования не хуже 0,02 мм по полю. Измерение

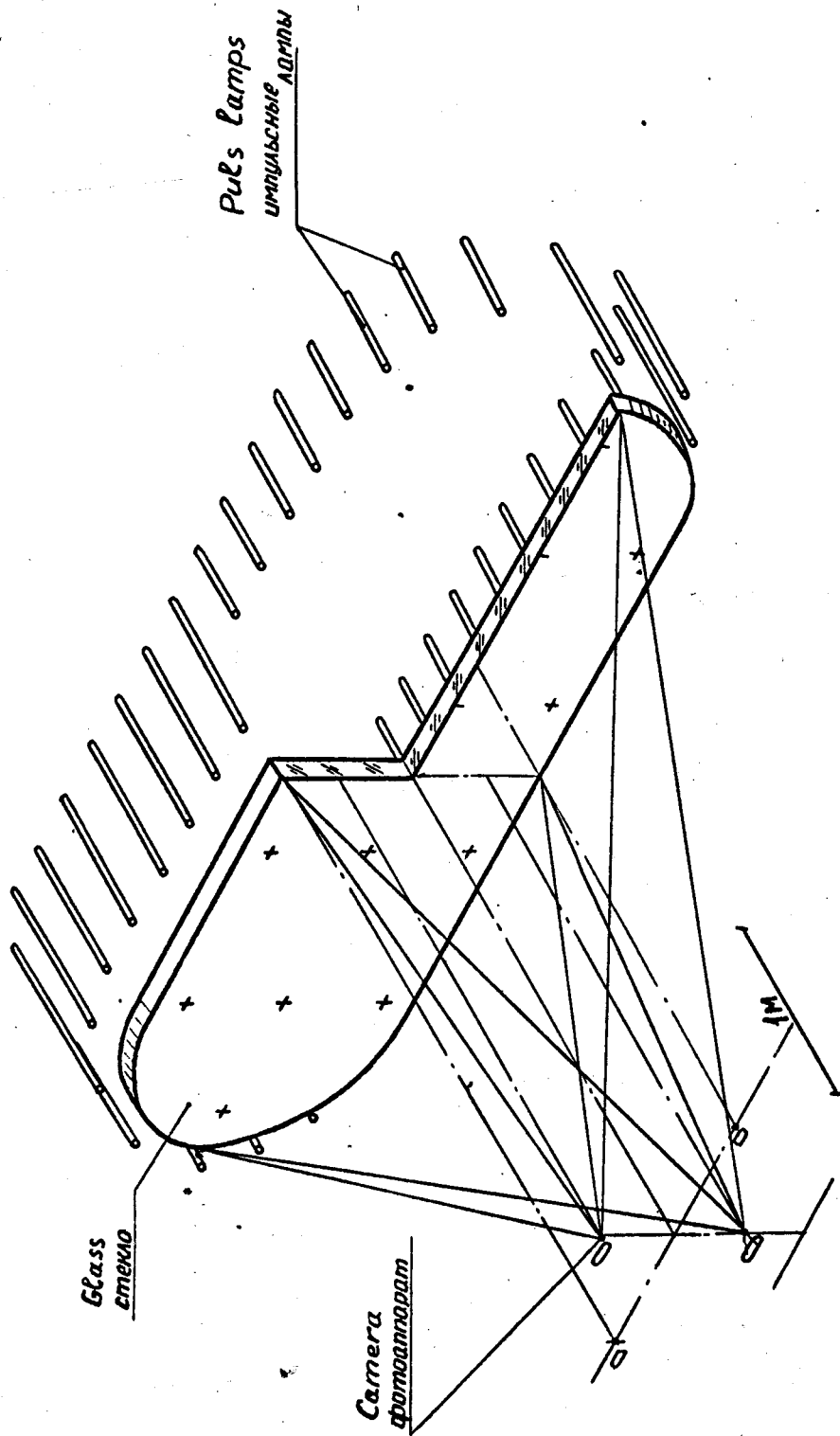


Рис.3. Схема фотографирования камеры СКАТ.

дисторсии должно быть проведено с точностью 0,005 мм.

- Разрешение по полю 50 - 40 л/мм в центре и 20-15 л/мм на краю поля зрения.

- Выравнивание пленки на прижимной рамке - не хуже 0,005 мм.

- Параллельность плоскости фотослоя посадочной поверхности фланца фотокамеры - не хуже 0,05 мм.

Выполнение перечисленных требований позволит производить качественную съемку всего объема камеры с уменьшением Г : 20 по переднему плану фотографирования. При этом можно ожидать разрешения до 20 пузырьков на см пути трека в большей части объема камеры.

Фотографирование будет осуществляться на 70-мм перфорированную пленку (рис.4 ). Размеры кадров на центральных объективах-214 x 58 мм<sup>2</sup>, на боковых--100 x 58 мм<sup>2</sup>, шаг протяжки равен соответственно 228 мм и 114 мм. Перфорации на пленке в два раза реже, чем на стандартной 70-мм пленке, что согласуется со стандартом, принятым для камер "Мирабель" и "Гаргамель".



Служебная информация, записываемая для каждого кадра, включает:

- Марки Бреннера .
- Номер кадра в цифровом и двоично-десятичном коде .
- Номер пленки в цифровом коде .
- Номер объектива в цифровом и двоичном коде .
- Номер пленки, кадра, и другая желаемая информация в виде, удобном для прочтения устройствами типа НРД .
- Вресты для НРД.

Общее расположение и размеры бокса служебной информации согласованы с аналогичными данными для камеры "Мирабель". Расположение и размеры марок Бреннера аналогичны размещению этих признаков на пленках двухметровой водородной камеры ЦЕРН и камеры "Гаргамель".

#### Освещение камеры

Освещение камеры будет осуществляться 28 импульсными лампами, расположенными в рабочем объеме. Каждая лампа помещена в стеклянный баллон и снабжена коллимирующим устройством, создающим поток света только в направлении, перпендикулярном направлению осей объективов.

Создание такого потока обеспечивает равномерное освещение камеры по глубине (пузырьки, находящиеся у поверхности стекла и в глубине камеры, получают и отражают в направлении объективов одинаковое количество света), предотвращает излиш-

ную засветку стенок и мембраны камеры, позволяет проводить обработку событий, происшедших на фоне осветительной системы, и т.д.

Коллимирующее устройство ламп аналогично примененному в камере Мичиганского университета /4/, состоит из ряда шторок и оптических коллимирующих элементов.

#### Общая конструктивная компоновка камеры

Конструктивно камера СКЛТ представляет собой сосуд из нержавеющей стали с рабочей областью 4,5 x 1,6 x 1,1 м (рис.5). Стекло (с размерами 4200 x 1200 x 100 мм<sup>3</sup>), отделяющее рабочую жидкость от воды, в охранном объеме будет закреплено в подвижной обойме. Максимальное перемещение стекла (за счет сжатия воды при подаче давления) не будет превышать 1 мм.

Корпус камеры состоит из нескольких составных частей: задняя стенка, служащая одновременно для размещения клапанов изменения давления; корпус рабочего объема, изготовляющийся из антимагнитной нержавеющей стали; промежуточное кольцо для крепления обоймы со стеклом, и охранный объем. Задняя стенка и охранный объем изготовляются из стали и являются частью магнитопровода. Камера целиком собирается отдельно и затем вкатывается в полость магнита.

Для нагрева и термостатирования камеры в рабочем объеме будут установлены системы медных труб диаметром 20 мм, рас-



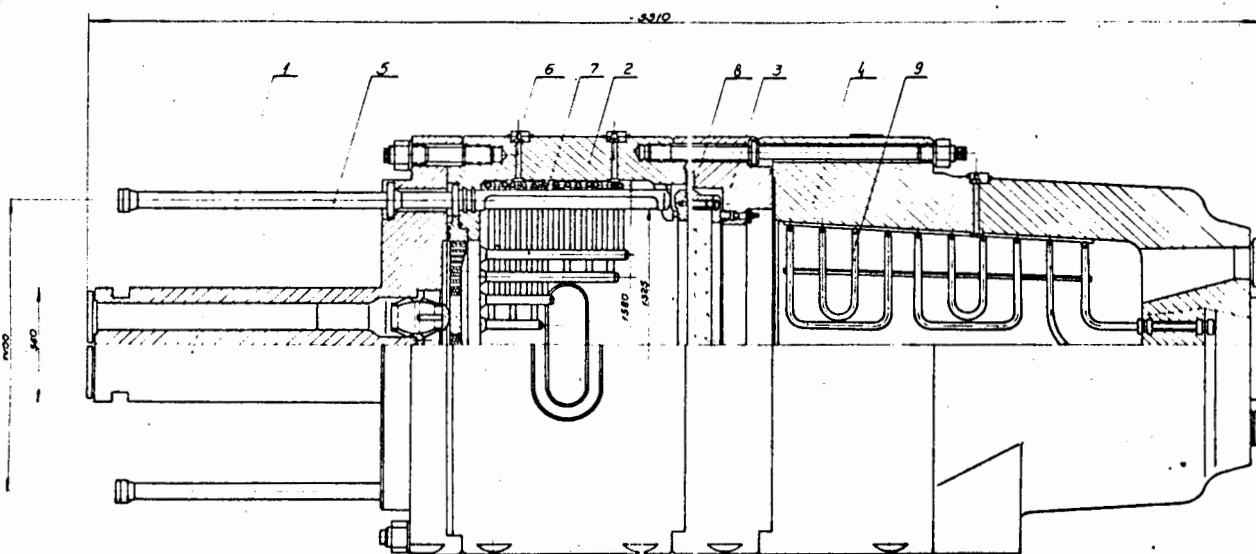
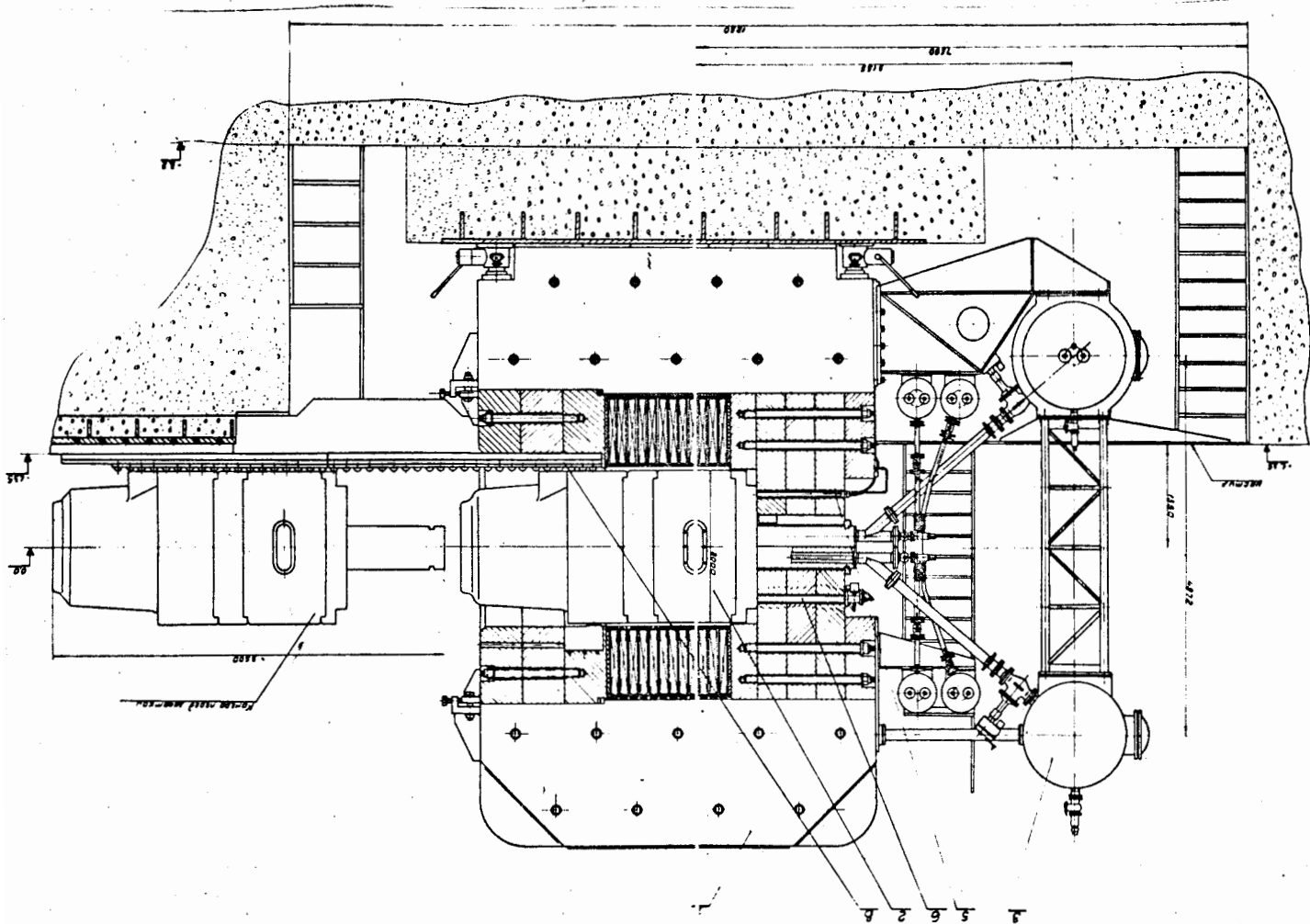


Рис.5 а) Общий вид камеры СКАТ.

Поперечный разрез корпуса камеры. 1 - блок системы расширения; 2 - корпус рабочего объема камеры; 3 - промежуточное кольцо; 4 - корпус охранного объема; 5 - обойма для импульсной лампы; 6 - датчик температуры; 7 - трубы системы термостатирования; 8 - обойма с "плавающим" стеклом; 9 - трубы системы термостатирования охранного объема.

Рис. 5 б) Общий вид камеры сжатия в машине.



полагающиеся в верхней и нижней частях рабочего объема.

Цикл изменения давления в камере будет осуществляться двадцатью пятью клапанами с проходным отверстием диаметром 120 мм, через общую мембрану, расположенную в задней стенке камеры. Конструкция клапанов позволяет производить их замену без разборки магнита и камеры.

### М а г н и т

Камера СКАТ будет работать в магнитном поле напряженностью 25-27 кэ. При конструировании магнита и камеры большое внимание было уделено созданию такой совместной конструкции, чтобы при минимально возможных потерях в обмотке получить в камере необходимую напряженность поля с удовлетворительной неоднородностью,

В процессе конструирования были проведены модельные испытания и расчет на ЦВМ плоской задачи распределения напряженности поля с целью определения оптимального варианта конструкции. Основные параметры магнита приведены в таблице I.

Таблица I

#### Основные данные магнита камеры СКАТ

Напряженность магнитного поля в центре рабочего объема	25000 гаусс
Неоднородность поля в области 0,8 линейных размеров рабочего объема камеры не хуже	10%
Номинальный ток возбуждения	13000а
Номинальное падение напряжения	645в
Потери в обмотке	8,4 мВт
Вес магнита	1250 тонн

## Возможные физические исследования на камере СКАТ

Пропан-фреоновая камера СКАТ будет являться прибором, позволяющим проводить широкий круг исследований при энергиях серпуховского ускорителя. Достоинствами пропан-фреонового заполнения являются:

- высокая эффективность к регистрации  $\gamma$  - квантов;
- большая тормозная способность рабочего вещества;
- большая плотность вещества, позволяющая регистрировать редкие процессы. Эти качества камеры позволяют детально изучать процессы, идущие с образованием  $\pi^0$  - мезонов и  $\gamma$  - квантов, эффективно изучать рождение и взаимодействие вторичных частиц, образующихся с малыми сечениями, и, наконец, использовать камеру при проведении экспериментов с нейтрино.

Предполагается, что на камеру СКАТ будут выводиться нейтринный пучок и пучки с радиочастотной сепарацией на энергии:  $K^\pm$  - 20 ÷ 30 Гэв/с;  $\bar{p}$  - 17 - 40 Гэв/с;  $P^+$  до 46 Гэв/с; а также протоны и отрицательные пионы с импульсом до 60 Гэв/с.

Данные о возможностях камеры СКАТ при регистрации различных процессов приведены ниже.

Рис. 6 показывает зависимость точности измерения импульса частиц от длины измеряемого трека в камере (расчет сделан в предположении, что точность определения координат

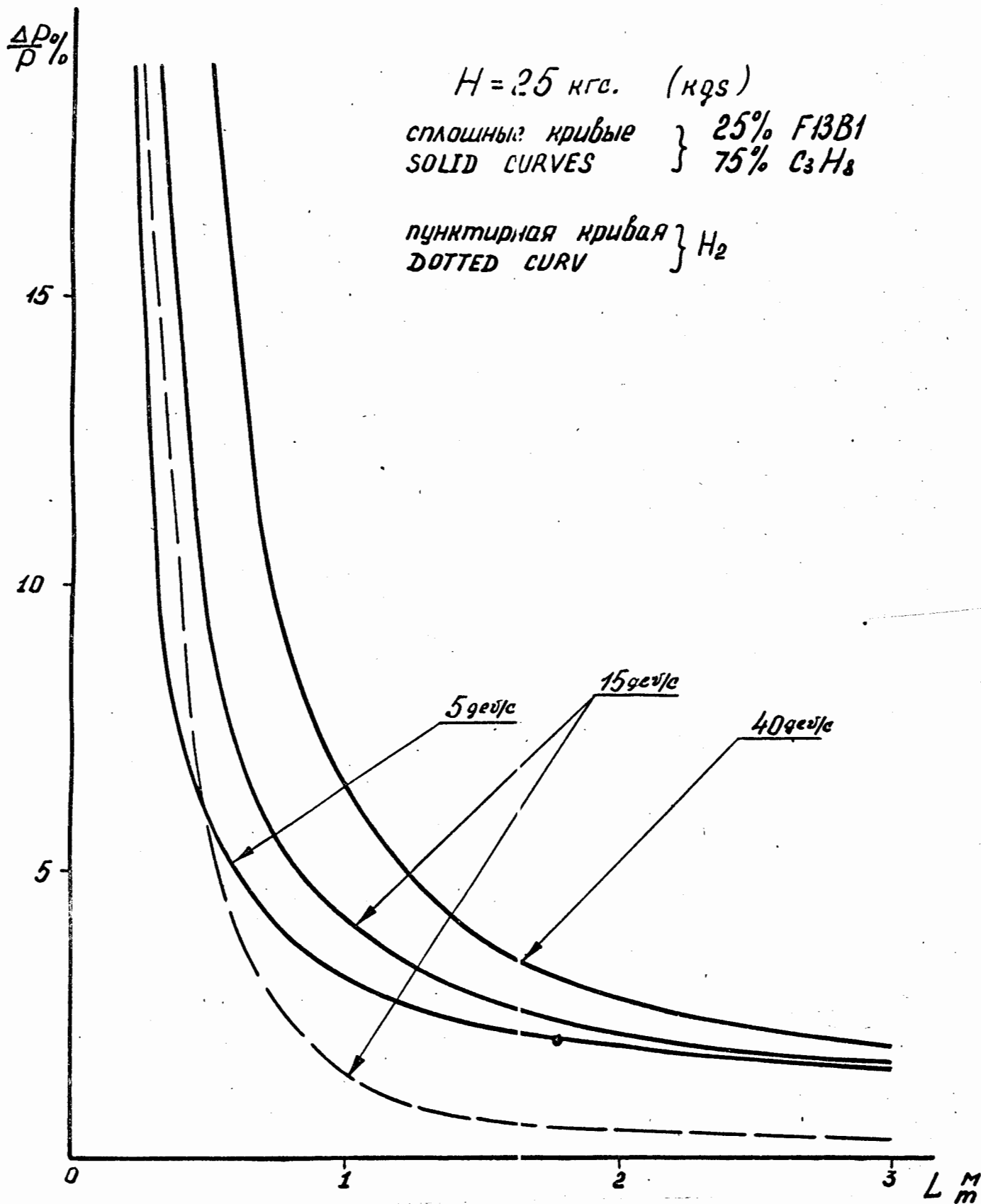


Рис.6. Относительные ошибки в определении импульсов  $\pi^-$ -мезонов.

точки на треке в объеме камеры - 1 мм). Как видно из графика, при измерении импульсов  $\pi^-$ -мезонов в интервале 5 - 40 Гэв/с на длине 1 м в смесях пропана с бромистым фреоном можно ожидать ошибок примерно 3 - 8%. Существующие в настоящее время методы учета многократного рассеяния позволяют уменьшить эту величину приблизительно на одну треть.

На рис. 7 показаны вероятности конверсии всех 6, 12 и 16  $\gamma$  - квантов от распадов 3, 6 и 8  $\pi^0$  - мезонов соответственно, в зависимости от потенциальной длины пролета, выраженной в радиационных длинах.

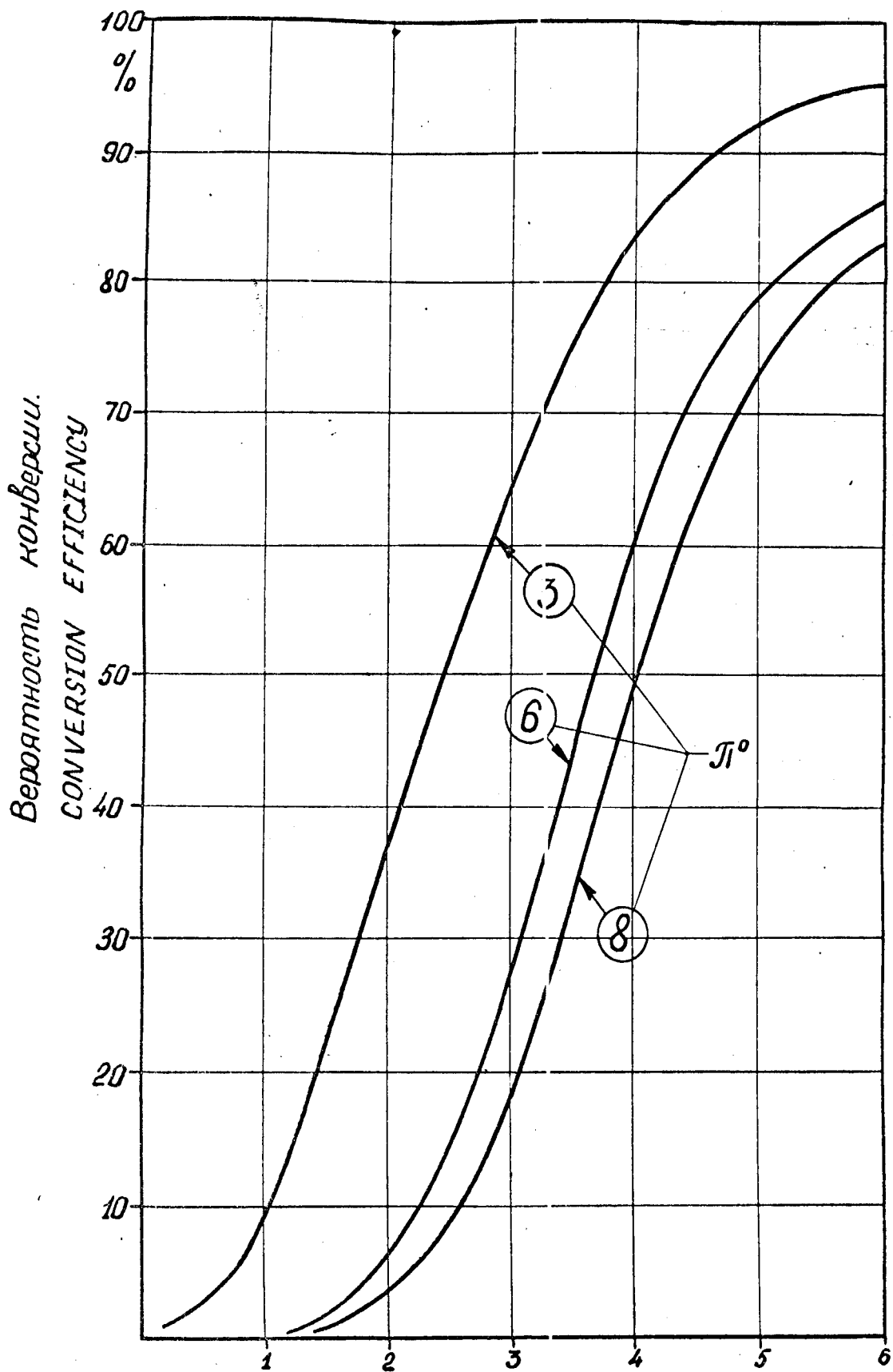
В таблице II приведены усредненные вероятности регистрации различного числа  $\gamma$  - квантов в камере СКАТ в зависимости от типа заполнения.

Таблица II.

Заполнение	$W_1$	$W_6$	$W_{12}$
Ф13В1	0,995	0,92	0,78
25% Ф13В1 75% C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,97	0,83	0,68
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,84	0,35	0,12

где:

$W_1$  - вероятность конверсии в камере отдельного  $\gamma$ -кванта;  
 $W_6, W_{12}$  - вероятности зарегистрировать все шесть или двенадцать  $\gamma$ -квантов, образовавшихся при распаде трех или шести  $\pi^0$ -мезонов соответственно.



Потенциальный пробег (в рад. длинах).  
 THICKNESS OF MATERIAL (RAD LENGTH)

Рис. 7. Вероятность конверсии всех 6, 12 и 16  $\gamma$  - квантов от распадов 3, 6 и 8  $\pi^0$  - мезонов соответственно, в зависимости от потенциальной длины пролета, выраженной в радиационных длинах.

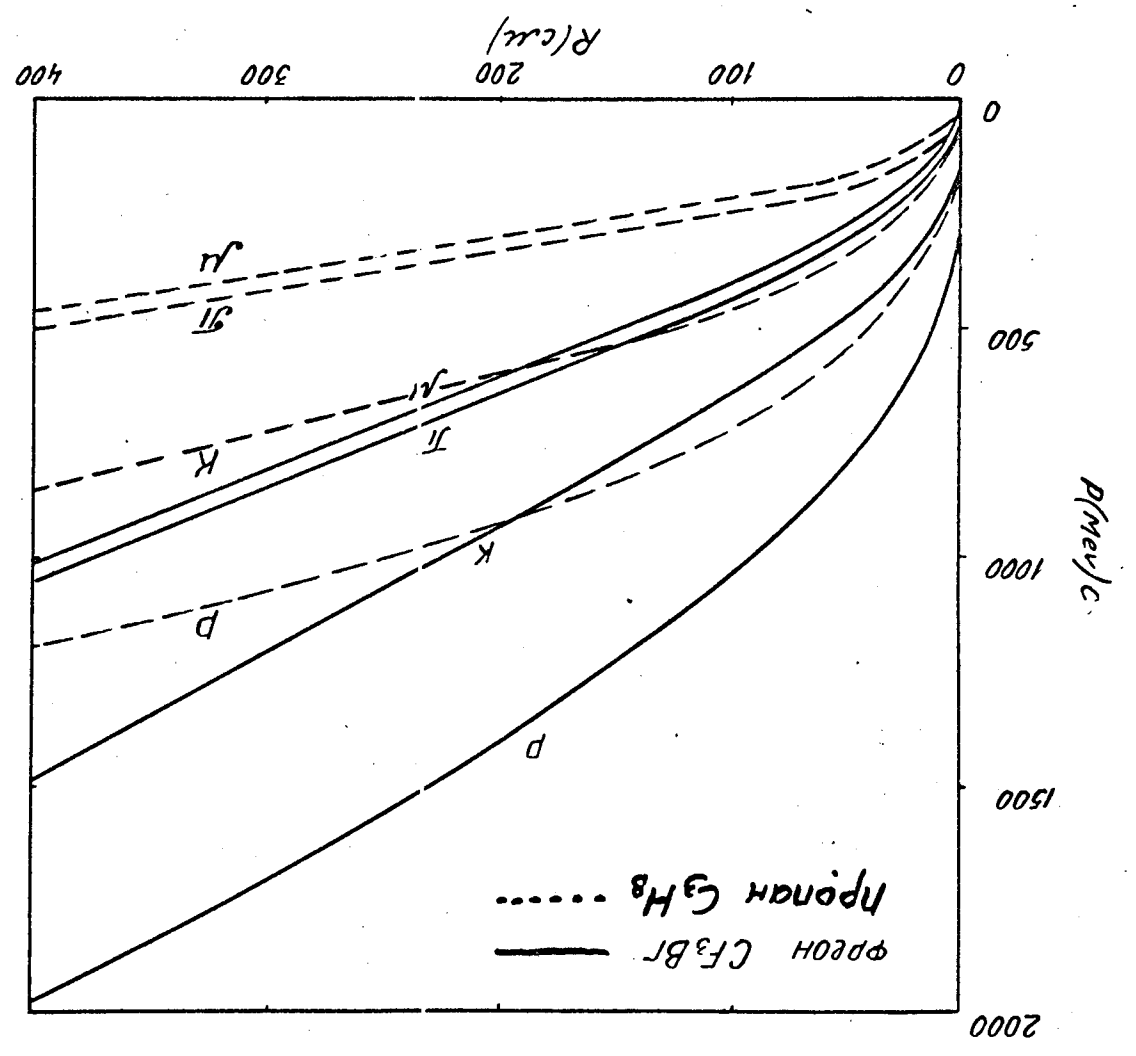
Приведенные в таблице II цифры рассчитаны для потенциальной длины 2 м и импульса  $\gamma$  - кванта  $\sim 1$  Гэв/с. Из этих данных видно, что даже вероятность одновременного наблюдения 6-12  $\gamma$  - квантов (при рождении 3-6  $\pi^0$ -мезонов) остается довольно высокой. Для сравнения можно отметить, что в водородной камере таких же размеров вероятность регистрации отдельного  $\gamma$  - кванта будет лишь около 10%.

Существенную роль при идентификации сорта частиц играет величина их пробегов в камере. На рис. 8 приведены /2/ величины ионизационных пробегов различных частиц в пропане и пролитом фреоне. Средняя величина геометрического пробега частиц в камере составляет  $\sim 1,3$  метра. С учетом угловых распределений средняя величина потенциального пробега будет больше длины ядерного пробега. Это дает возможность более надежно отличать  $\pi$  - мезоны от  $m$  - мезонов, что особенно существенно при нейтринных экспериментах.

Кинематический анализ событий в пузырьковых камерах, наполненных тяжелыми жидкостями, позволяет произвести однозначную идентификацию типа взаимодействий примерно для одной трети регистрируемых событий. Привлечение данных ионизационных измерений дает возможность существенно уменьшить процент неидентифицированных событий. В камерах, заполненных тяжелыми жидкостями, имеется возможность проведения ионизационных



Рис. 8. Моментационные профили  $M, \bar{M}, K$  - мезонов и протонов в протоне (---) и фреоне (—).



измерений с целью идентификации заряженных частиц в интервалах до  $\sim 1,2$  Гэв/с в области падения ионизирующей способности частиц с энергией и в области так называемого "логарифмического" роста потерь энергии. На рис. 9 приведены, для примера, /5/ кривые зависимости плотности следов от импульсов частиц на треках  $\mu, \pi, K$  - мезонов и протонов в бромистом фреоне, рассчитанные на основе имеющихся экспериментальных данных. Измерение плотности следов с точностью  $\sim 3\%$  на треках длиной  $\sim 1$  м позволит разделить  $\pi$ -мезоны и протоны в пропане в интервалах импульсов 2-15 Гэв/с, во фреоне - в интервале 2,5 - 30 Гэв/с.

Камера СКАТ будет хорошим детектором событий, идущих с малыми сечениями.

В камере можно будет эффективно изучать взаимодействия и другие свойства гиперонов. Например, при облучении заполненной пропаном камеры  $K$  - мезонами на 100 000 фотографиях (при условии вхождения в камеру 10  $K$  - мезонов за цикл) будет зарегистрировано около 20.000 случаев рождения  $\Lambda^0$  и  $\Sigma^+$  гиперонов, несколько тысяч  $\Sigma^0, \Xi^0$  - гиперонов и около сотни  $\Omega^-$  - гиперонов. Рождение большого числа странных частиц дает также возможность более детального исследования различных мод распада, особенно распадов с участием нейтральных частиц и  $\Lambda$  - распадов. На этих же пленках будет зарегистрировано около тысячи случаев взаимодействия гиперонов. Эти расчеты приведены в предположении, что сечения рождения и взаимодействия гиперонов останутся на уровне, известном при достижимых сегодня энергиях.

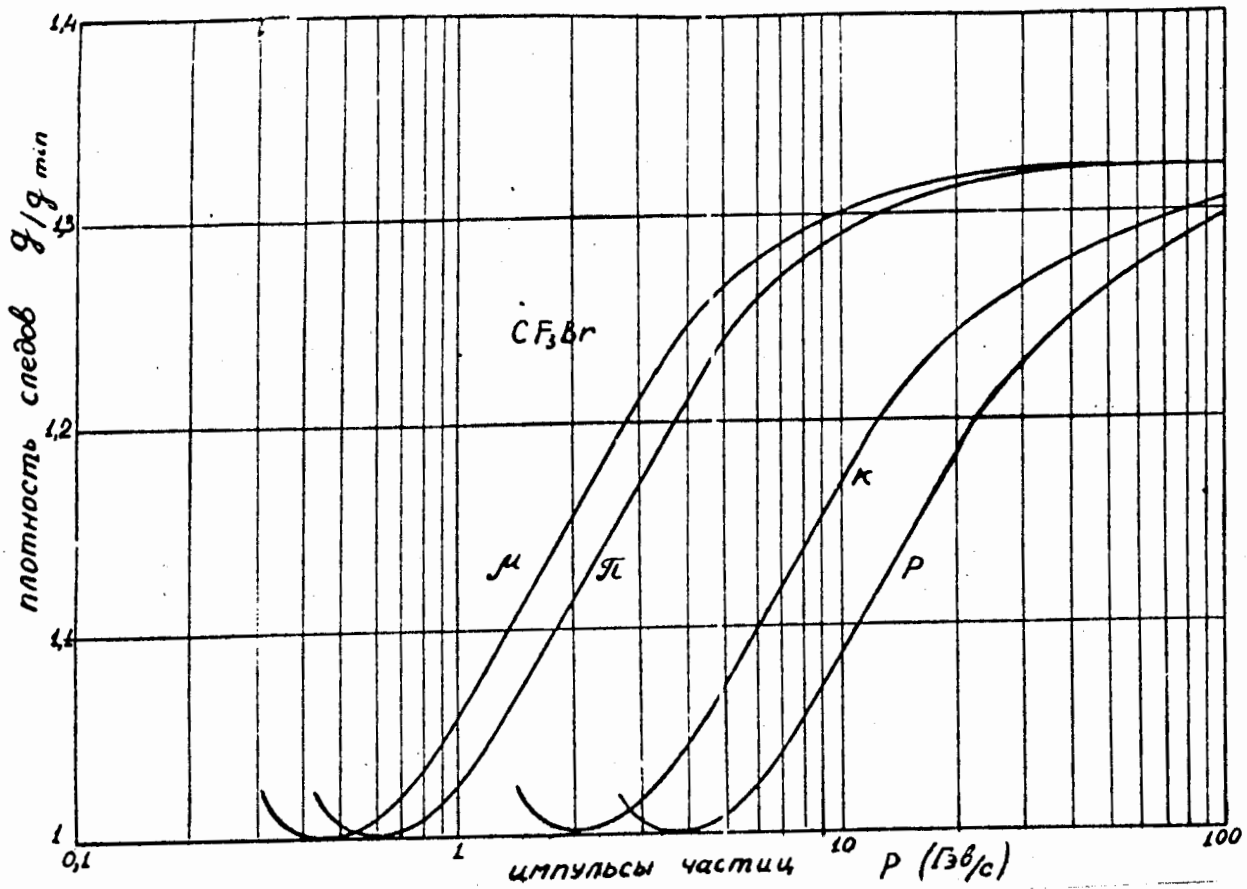


Рис.9. Зависимость плотности следов заряженных частиц на треках  $\mu, \pi, K$  - мезонов и протонов в бромистом фреоне.

Изучение взаимодействий гиперонов и антигиперонов в области высоких энергий имеет важное значение для проверки предсказаний теорий симметрии и модели кварков.

В камере можно будет проводить широкий круг исследований, связанных с изучением свойств известных мезонных и барионных резонансов в области высоких энергий и поиски новых, более тяжелых резонансов и частиц. Особенное значение имеет исследование различных каналов распада резонансов на нейтральные частицы.

Большой интерес представляет использование камеры в нейтринном эксперименте. Спектр нейтрино на ускорителе ИФВЭ и большие размеры камеры позволят регистрировать до тысячи событий взаимодействия в сутки при фреоновом заполнении камеры и интенсивности ускорителя  $10^{13}$  протонов в импульсе. При этом 100–200 событий будут принадлежать взаимодействиям нейтрино в области энергий  $\sim 10$  Гэв/с, недоступной другим ныне действующим ускорителям. Значительная статистика и широкий интервал энергий нейтрино даст возможность существенно продвинуться в изучении таких вопросов, как ход сечения взаимодействия нейтрино с энергией, поиски промежуточного бозона (до  $M_w \approx 5$  Гэв), существование нейтральных токов, изучение слабых адронных токов, поиски тяжелых лептонов и т.д.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. International Colloquium on Bubble Chambers, held at Heidelberg, 1967, CERN N67-26, vol.1,11,1967.
2. M.Derrick, ANL-7265, 1966.
3. Leveque (Saclé). Частное сообщение.
4. B.Roe, D.Sinclair, I.Vander Velde.  
XII Международная конф. по физике высоких энергий, Дубна, 1964 г., т.П., М-1966.
5. Э.П.Кистенев, Е.П.Кузнецов, Д.Г.Рябов, ИФВЭ, СЭФ, 68-18-К. 1968 г.

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 января 1969 года.