



017701424

P1 - 9043

С.А.Аверичев, Т.А.Аверичева, В.С.Сунгатулин,
К.Д.Толстов, Р.А.Хошмухамедов, В.П.Баландин,
Н.А.Галяев, Ю.С.Холдырев, В.Г.Воинов, Г.С.Рязанов
М.И.Третьякова, М.М.Чернявский, Т.Т.Рискиев

ОБЛУЧЕНИЕ ЯДЕРНЫХ ФОТОЭМУЛЬСИЙ
В ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ
УСТАНОВКИ ЦЕРНа "МАМОНТ"
НА СЕРПУХОВСКОМ УСКОРИТЕЛЕ

4
22

1975

С.А.Аверичев, Т.А.Аверичева, В.С.Сунгатулин,
К.Д.Толстов, Р.А.Хошмухамедов, В.П.Баландин,
Н.А.Галяев,¹ Ю.С.Ходырев,¹ В.Г.Воинов,² Г.С.Рязанов²
М.И.Третьякова,³ М.М.Чернявский,³ Т.Т.Рискиев⁴

**ОБЛУЧЕНИЕ ЯДЕРНЫХ ФОТОЭМУЛЬСИЙ
В ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ
УСТАНОВКИ ЦЕРНа "МАМОНТ"
НА СЕРПУХОВСКОМ УСКОРИТЕЛЕ**

¹Институт физики высоких энергий, Серпухов

²Институт физики высоких энергий АН КазССР

³Физический институт им. П.Н.Лебедева АН СССР

⁴Физико-технический институт АН УзССР

В 1960 г. группа специалистов ЦЕРНа под руководством Л.Гоффманна создала установку "Мамонт"/1,2/, позволяющую получить напряженность поля $H \sim 200$ кГс в объеме $100+200$ см³, достаточном для размещения стопки ядерной фотоэмульсии толщиной 2-3 см. При этом максимальная неоднородность поля в рабочем объеме не превышает 4%. Вся аппаратура для получения импульсного магнитного поля состоит из трех основных узлов: конденсаторной батареи общей емкостью 75000 мкФ, способной запасти энергию 300 000 Дж; зарядного устройства с блоком автоматики; катушки магнита. Принцип работы системы можно проиллюстрировать рис. 1.

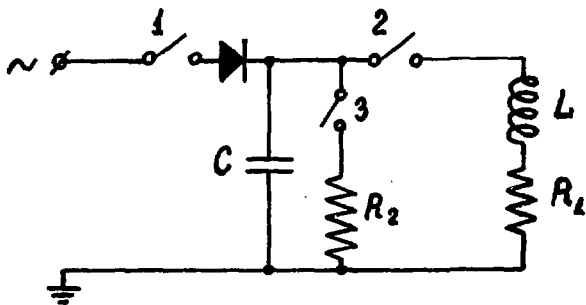


Рис. 1

При замыкании ключа 1 конденсаторная батарея будет заряжаться. Через семь секунд напряжение батареи достигнет своего максимального значения $U_0 = 2,8$ кВ. В момент, предшествующий прохождению пучка частиц через катушку L, специальная схема синхронизации замыкает ключ 2, и конденсаторная батарея начинает разряжаться. При этом в колебательном контуре C, L, R, где R_1 - собственное сопротивление катушки, возникают свободные затухающие колебания, а ток в контуре

$$J(t) = \frac{U_0}{\omega \cdot L} e^{-\alpha t} \sin \omega t, \quad (1)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{R_1}{2L}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_1^2}{4L^2}}.$$

В момент $t_{\text{пик}} = \frac{\delta}{\omega}$, где $\text{tg } \delta = \frac{2\omega L}{R_1}$, ток в контуре и, соответственно, магнитное поле в катушке достигают своего максимального значения. Через время $t \sim 2t_{\text{пик}}$ ток в контуре меняет свое направление и, чтобы защитить батарею электролитических конденсаторов от смены полярности напряжения, в момент, предшествующий $2t_{\text{пик}}$, замыкают ключ 3, подключая к контуру сопротивление R_2 .

При этом затухающий колебательный процесс переходит в аperiodический, и ток в контуре плавно спадает до нуля.

Наряду с такими достоинствами, как большая напряженность поля в достаточном объеме, высокая степень однородности поля в этом объеме, надежность и портативность (при весе ~ 30 т), установка "Мамонт" обладает и некоторыми недостатками:

а) от импульса к импульсу напряжение батареи U_0 изменяется в пределах $\pm 3\%$, что приводит к разбросу величины магнитного поля в тех же пределах;

б) сравнительно быстрое нарастание магнитного поля и его спад приводят во время прохождения пучка

$t = 0,5$ мс к тому, что примерно для 26% всех частиц величина поля на $3 \pm 10\%$ меньше его максимального значения;

в) при такой длительности пучка неточная синхронизация момента времени, когда H максимально, с временем прохождения пучка приводит при ошибке в 100 мкс к увеличению разброса поля в 2-2,5 раза.

Установка "Мамонт" использовалась в ЦЕРНе для облучения фотоэмульсионных камер протонами и пионами различных энергий. Часть этих камер была передана в ряд лабораторий СССР. При исследовании взаимодействий пионов и протонов с нуклонами и ядрами эмульсии в этих камерах получен ряд интересных результатов /3-5/.

В 1970 г. установка "Мамонт" была передана дирекцией ЦЕРНа в ОИЯИ для использования ее на ускорителе ИФВЭ в г. Серпухове. Установка была размещена на ускорителе для облучения эмульсий π^- -мезонами с импульсом ~ 50 ГэВ/с.

Однако облучение π^- -мезонами на имеющихся в ИФВЭ пучках встретило целый ряд затруднений, связанных с тем, что необходимая интенсивность $\sim 10^4$ част./см² требовала сотен рабочих импульсов, а это увеличивало неопределенность поля, понижало надежность установки из-за ложных срабатываний от других одновременно работающих установок ускорителя и сокращало срок службы катушки установки. Кроме того, пучки π^- -мезонов ускорителя для работы с электронной аппаратурой имели недопустимо большую растяжку, а пучки для пузырьковых камер - малую интенсивность.

Условия, необходимые для успешного облучения, появились при осуществлении системы быстрого вывода пучка протонов.

Пучок π^- -мезонов с импульсом $P = 50$ ГэВ/с формировался начальной частью канала сепарированных пучков, который был создан для жидководородной камеры "Мирабель"/6/. Используемая часть канала представляет собой магнитный анализатор, состоящий из двух групп односторонне отклоняющих магнитов, полевой квадрупольной линзы между ними, входного и выходного объективов, состоящих из 4 квадрупольных линз каждый (рис. 2а). Магнитный анализатор обеспечивал выделение

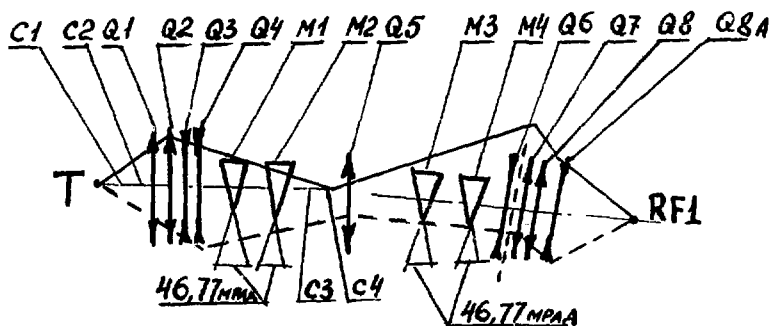


Рис. 2а. Оптическая схема канала для формирования пучков π^- -мезонов с импульсом 50 ГэВ/с: ход лучей в горизонтальной (сплошная кривая) и вертикальной (пунктирная кривая) плоскостях (Т - внешняя мишень, С - коллиматоры, Q - квадрупольные линзы, М - отклоняющие магниты, RF-1 - дефлектор сепаратора). Пунктиром указано расположение экспериментальной установки.

частиц с заданным импульсным разбросом и полную ахроматизацию пучка на выходе. Для генерации вторичных частиц использовалась внешняя мишень из меди размером $2 \times 1,5 \times 150$ мм³, которая устанавливалась на трассе быстро выведенного из ускорителя пучка протонов (вывод "А")/7/ на расстоянии 10 м от входного объектива. Системой быстрого вывода могло выводиться из ускорителя на мишень от одного до тридцати сгустков ускоренных протонов. Последнее число сгустков соответствует всей интенсивности протонов в ускорителе, которая равнялась $n_p = 1,2 \cdot 10^{12}$ протонов за цикл. Эффективность взаимодействия выведенного протонного пучка с мишенью составляет, примерно, 20%.

Входной объектив Q1-Q4 (с фокусировкой типа ФФДД в горизонтальной плоскости) обеспечивает захват вторичных частиц в телесном угле $\Omega = 36$ мкстр с углом образования $\theta = 0^\circ$. Объектив Q1-Q4 фокусирует пучок в импульсный коллиматор С4 по горизонтали и совместно с полевой линзой Q5 формирует параллельный пучок по вертикали. Анализирующие магниты M1, M2, отклоняющие пучок на угол 93,54 мрад (такой же угол отклонения имеют магниты M3, M4), создают на коллиматоре С4 дисперсию пучка, равную 14 мм на 1% ($\Delta P/P$). Для пропускаемого коллиматором С4 пучка осуществляется компенсация линейной и угловой дисперсии с последующим формированием его на стопке фотопластинок (на рис. 2а местоположение показано штриховой линией - между линзами Q6 и Q7) и на управляющем счетчике, помещенном в точку RF-1. Управляющий счетчик вырабатывал сигнал для синхронизации пучка системой "Мамонт". Раскрытие С4 составляло ± 20 мм. Соответствующий расчетный спектр частиц на выходе из магнитного анализатора показан на рис. 2г. Расчетные горизонтальный и вертикальный профили пучка в сечении расположения фотопластинок приведены на рис. 2б и в. Как показывает практика настройки канала, отклонение реальных распределений пучка от расчетных не превышает 10%.

Оценка интенсивности π^- -мезонов в пучке проводилась с помощью соотношения:

$$n_{\pi} = n_p \epsilon_T \frac{d^2 N}{dp d\Omega} \Omega \Delta p,$$

где $\frac{d^2 N}{dp d\Omega}$ - выход π^- -мезонов на 1 взаимодействовавший первичный протон.

Величина $\frac{d^2 N}{dp d\Omega}$ определялась с учетом экспериментальных данных по сечениям взаимодействия, полученных в ИФВЭ/8/, и равна $2,5 \cdot 10^{-2} \pi^- / \text{ГэВ/с.ср.}$ Подстановка в эту формулу указанных выше значений входящих в нее величин (для ΔP используется распределение на рис. 2г) дает $n_{\pi} \sim 7 \cdot 10^5$ частиц за цикл при выводе из уско-

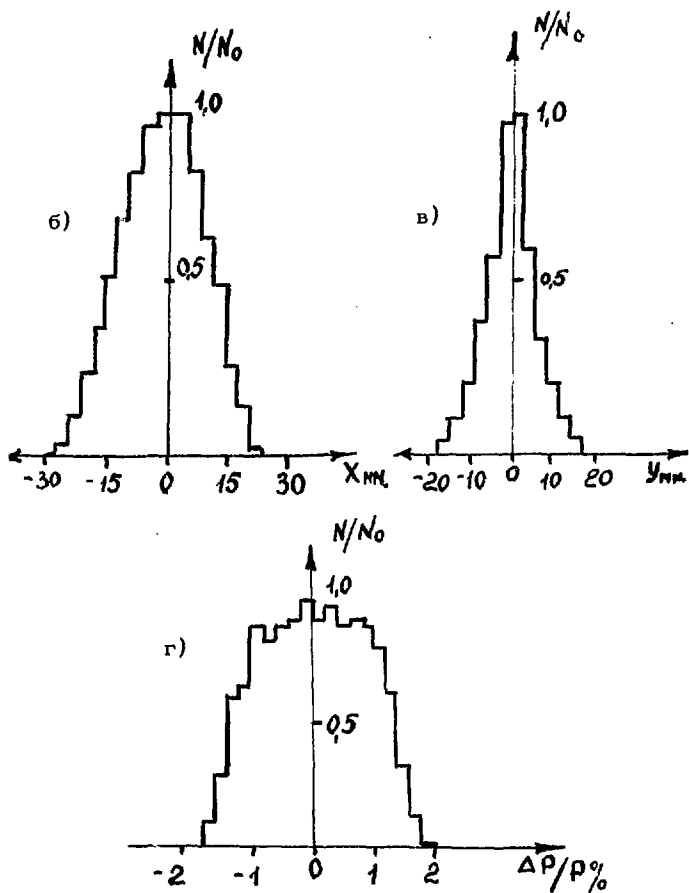


Рис. 2. б) Расчетный размер пучка на экспериментальной установке по горизонтали и в) - по вертикали. г) Импульсный спектр частиц, отбираемых в канал.

рителя на мишень полной интенсивности ускоренных протонов. Для контроля сброса протонного пучка на мишень использовался монитор Budal 2/9/.

Выясним, какие преимущества дает система быстрого вывода для облучения ядерных фотоэмульсий в импульсном магнитном поле установки "Мамонт".

Как видно из формулы (1), максимальное значение тока в катушке

$$J(t_{\text{пик}}) = J\left(\frac{\delta}{\omega}\right) = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\alpha t_{\text{пик}}}$$

Отсюда, отношение тока, или, что то же самое, магнитного поля, в момент t к его пиковому значению равно

$$\frac{H(t)}{H(t_{\text{пик}})} = \frac{1}{\omega \sqrt{LC}} \sin \omega t e^{-\alpha(t-t_{\text{пик}})} \quad (2)$$

Подставив в эту формулу значения параметров катушки $L = 31$ мкГн, $R_1 = 5,9 \cdot 10^{-3}$ Ом и $C = 75000$ мкФ, найдем, что если $t = t_{\text{пик}} \pm \Delta t$, где $\Delta t = 5$ мкс, то за время прохождения пучка через катушку магнитное поле изменяется не более чем на 0,001%, т.е. практически постоянно во времени. При ошибке в синхронизации момента $t_{\text{пик}}$ с моментом прохождения пучка в 300 мкс, т.е. $t = t_{\text{пик}} - 300$ мкс $\pm \Delta t$, относительное изменение поля равно всего лишь 0,068%, а $H(t) \sim 0,98 \cdot H(t_{\text{пик}})$.

Таким образом, при использовании быстрого однооборотного вывода протонов на мишень можно облучить стопку эмульсии одним импульсом частиц за время $t \sim 5$ мкс. Преимущества этого способа очевидны - устраняется разброс магнитного поля из-за невоспроизводимости напряжения U_0 батареи конденсаторов, магнитное поле с очень высокой степенью точности (даже при больших ошибках в синхронизации) постоянно во времени.

Единственный источник неопределенности поля в этом случае - некоторая неоднородность его в объеме эмульсионной камеры, не превышающая 4%.

Как показано выше, при ошибке синхронизации в 300 мкс поле практически постоянно во времени, но

оно на 2% меньше максимального. При ошибке в 200 мкс поле меньше пикового на 0,9%, а при ошибке в 100 мкс — на 0,2% с еще большим постоянством во времени. Таким образом, использование быстрого вывода позволяет ограничиться простой схемой синхронизации момента $t_{\text{пик}}$ с временем прохождения пучка с точностью $\pm 100 \div 200$ мкс. Такая точность может быть достигнута при визуальном наблюдении на экране двухлучевого осциллографа напряжения, пропорционального магнитному полю $H(t)$, и импульса, соответствующего моменту прохождения пучка через катушку. В соответствии с этим нами и была разработана схема синхронизации и формирования запускающего импульса установки "Мамонт" (рис. 3).

На вход ждущего блокинг-генератора 1 поступает синхронизирующий импульс с таймерной системы ускорителя. Одиночный импульс с выхода этого блока запускает ждущий мультивибратор с переменной длительностью 2. Задний фронт импульса мультивибратора вызывает срабатывание ждущего блокинг-генератора 3, выходной импульс которого с помощью блока 4 формирует импульс запуска установки "Мамонт". Регулировка длительности импульса мультивибратора 2 позволяет задерживать запуск установки на время, необходимое для синхронизации момента максимального поля и момента прохождения пучка в катушке.

Блок-схема установки, использованной нами для облучения стопок ядерной фотоэмульсии пучком π^- -мезонов с импульсом 50 ГэВ/с, показана на рис. 4. Синхронизирующий импульс, связанный с началом цикла ускорителя, поступает на вход блока синхронизации и своим выходным импульсом запускает установку "Мамонт". Поле в катушке начинает нарастать, и в момент $t_{\text{пик}}$ производится сбрасывание всей интенсивности ускорителя на мишень. На блок контроля (осциллограф С1-51) с датчика Холла, установленного в рабочем объеме катушки, поступает напряжение, пропорциональное $H(t)$, и импульс от системы индикации интенсивности пучка. Регулировкой задержки запуска "Мамонта" достигается совмещение

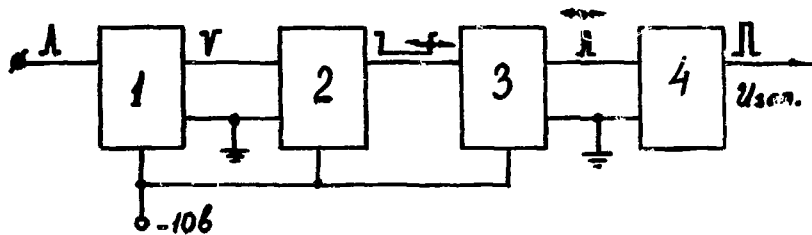


Рис. 3. Схема синхронизации и формирования запускающего импульса.

=

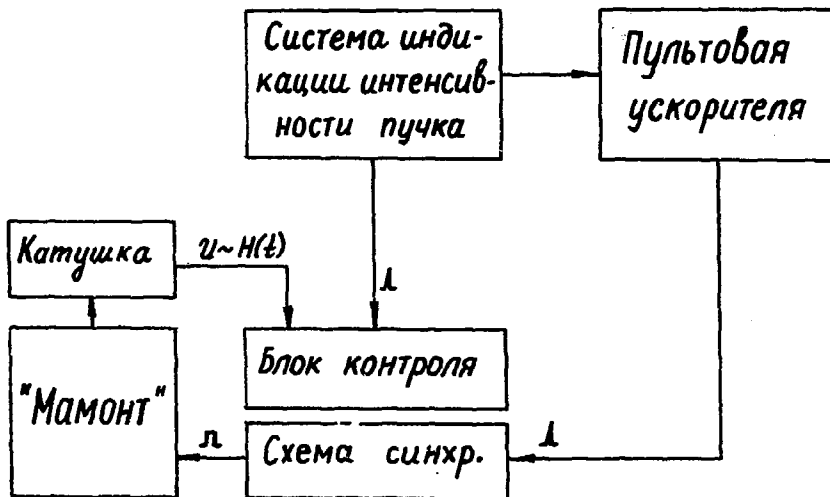


Рис. 4. Блок-схема установки "Мамонт".

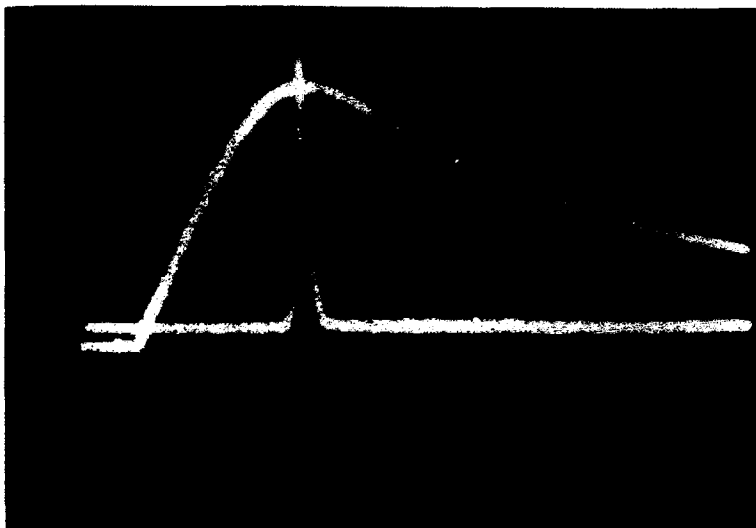


Рис. 5. Осциллограмма импульсов от датчика Холла и системы индикации интенсивности пучка.

момента $t_{\text{пик}}$ и времени прохождения пучка через катушку (рис. 5). С помощью этой установки было облучено -25 стопок ядерной фотоэмульсии НИИХИМФОТО-БР-2 диаметром 6 см и толщиной ≈ 3 см. Интенсивность пучка в эмульсии достигает $2 \cdot 4 \cdot 10^4$ част/см² при угловом разбросе $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ рад. Измерение импульсов на следах пучковых частиц показало, что напряженность поля в рабочем объеме эмульсионных камер в этом опыте соответствует расчетному и равно в среднем 180 кГс.

В заключение авторы выражают свою признательность дирекции ЦЕРНа и ИФВЭ, административному директору ОИЯИ В.Л.Карповскому, Л.Гоффману, В.О.Локку, А.И.Герцу, П.К.Маркову, М.И.Соловьеву за содействие в осуществлении опыта.

Авторы благодарны С.И.Любомулову, И.С.Марьину, В.С.Русакову, Н.М.Сухареву, И.Тучеку и службам ускорителя ИФВЭ за помощь при постановке эксперимента.

Литература

1. M. Morpurgo, L. Hoffmann, W.M. Gibson. CERN, 60-27.
2. E. Braunsreuther, J.C. Combe, L. Hoffmann. M. Morpurgo. CERN, 62-7.
3. Г.Б.Жданов, М.И.Третьякова, М.М.Чернявский, Труды ФИАН, т. 48, стр. 177, 1970.
4. С.А.Азимов, Л.Н.Свечникова, Л.П.Чернова, Г.М.Чернов. Известия АН СССР, сер. физ., т. 34, №9, 1970 г., стр. 1912.
5. Г.Б.Жданов, М.И.Третьякова, М.М.Чернявский. Известия АН СССР, сер. физ., т. 33, п. 9, стр. 1417, 1969.
6. Ф.Бернард, А.М.Вишневская, Н.А.Галаяев и др. Препринт ИФВЭ, 73-9, Серпухов, 1973.
7. А.А.Асеев, А.Г.Афонин, А.И.Дрождин и др. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, 1973, М., "Наука", 2, 160 (1973).

8.Yu.B.Bushnin, S.P.Denisov, S.V.Donskov et al.
Physics Letters, 29B, p. 48, 1968.
9.K.Budal. CERN, 67-17, Geneva, 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 июля 1975 года.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния



Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.
Заказ 20016. Тираж 620. Уч.-изд. листов 0,76.
Редактор Б.В. Колесова Подписано к печати 25.7.76 г.
Корректор Т.Е. Жильцова