

С 345и

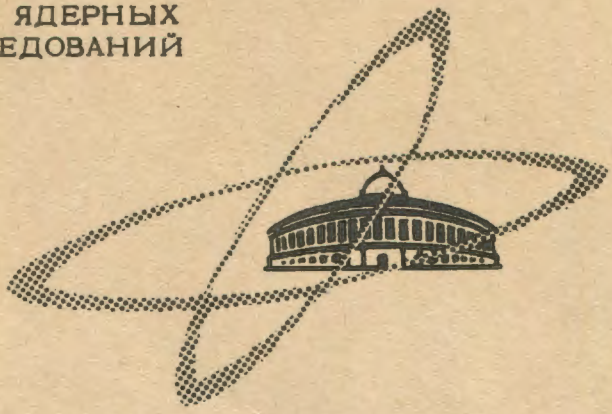
19/11

B-751

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2848-1



С.Б. Ворожцов, В.П. Дмитриевский,
Б.И. Замолодчиков, Н.Л. Заплатин, В.В. Кольга,
Н.И. Полумордвинова, В.С. Рыбалко, Л.А. Саркисян

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО
РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА ВЫВОДА ПУЧКА
ИЗ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЦИКЛОТРОНА

Доклад на Международной конференции
по изохронным циклотронам,
Гатлинбург (США), 2 - 5 мая 1966 года

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1966

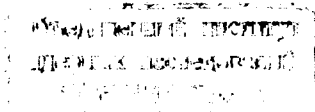
2848-1

УУЗ1/1, кр

С.Б. Ворожцов, В.П. Дмитриевский,
Б.И. Замолдчиков, Н.Л. Заплатин, В.В. Кольга,
Н.И. Полумордвинова, В.С. Рыбалко, Л.А. Саркисян

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО
РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА ВЫВОДА ПУЧКА
ИЗ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЦИКЛОТРОНА

Доклад на Международной конференции
по изохронным циклотронам,
Гатлинбург (США), 2 - 5 мая 1966 года



Проблема высокоэффективного вывода ускоренных частиц из релятивистского циклотрона (РЦ) является одной из основных, так как успешное использование РЦ как физической установки и нормальная эксплуатация ускорителя возможны только при практически полном выводе ускоренных частиц из камеры и применении внешних мишеней.

1. Наиболее эффективные методы вывода частиц из циклических ускорителей со стационарным магнитным полем основаны на создании резонансной связи между азимутальной и радиальной степенями свободы ускоряемой частицы на заданном радиусе.

При этом необходимо обеспечить условия отсутствия связи с аксиальными колебаниями частицы.

В релятивистском циклотроне наличие спиральной структуры магнитного поля вызывает появление внутренних нелинейных резонансов при частоте радиальных колебаний $Q_r = \frac{N}{q}$, где N — число спиралей, q — целое число (порядок резонанса). При $N = 8$ нелинейный резонанс 4-го порядка ($Q_r = 2$) соответствует энергии примерно 820 Мэв. Проект релятивистского циклотрона Окриджской национальной лаборатории (США)^{/1/} предусматривал использование нелинейного резонанса $Q_r = 8/4$ для создания системы вывода с эффективностью порядка 95%, которая получена на электронной модели этого ускорителя.

В проекте реконструкции синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ^{/2/} конечная энергия РЦ составляет 700 Мэв. При этом $Q_r = 1,8$ и непосредственное применение резонансного метода вывода невозможно.

В работе^{/3/} был предложен метод, при использовании которого частота радиальных колебаний на заданном радиусе может быть увеличена до необходимого значения, например, до двух. При этом частота аксиальных колебаний не изменяется. Следовательно, устраняется жесткая связь частоты радиальных колебаний с величиной энергии на заданном радиусе, существующая в изохронных циклотронах, и становится возможным применение такого модифицированного резонансного метода вывода в широком диапазоне конечных энергий.

Настоящий доклад посвящен дальнейшему развитию модифицированного резонансного метода вывода в применении к релятивистскому циклотрону на 700 Мэв.

2. Для изменения частоты радиальных колебаний при заданной энергии ускоренных частиц в структуру магнитного поля на радиусе, соответствующем этой энергии, вводится дополнительная гармоника с периодичностью $N/2$. При этом магнитное поле в meridional плоскости имеет вид

$$H_z(t, \phi) = H(r) \left\{ 1 + \epsilon_1 \sin\left(\frac{t}{\lambda} - N\phi\right) + \epsilon_2 \sin\left(\frac{t}{2\lambda} - \frac{N}{2}\phi + \delta\right) \right\}, \quad (1)$$

где $H(r)$ — среднее магнитное поле, ϵ_1 — амплитуда основной фокусирующей гармоники, ϵ_2 — амплитуда дополнительной гармоники, δ — фаза этой гармоники относительно основной, $2\pi\lambda$ — радиальный шаг основной структуры магнитного поля.

Будем полагать, что N — четное и $\epsilon_2 \ll \epsilon_1$.

Как показано в работе /3/, уравнение свободных радиальных колебаний в магнитном поле (1) можно с достаточной точностью представить в виде

$$\rho'' + [A_r + B_{1r} \cos\Phi + B_{2r} \sin\Phi] \rho = 0, \quad (2)$$

где

$$A_r = Q_{r0}^2 - \frac{\epsilon_2^2 R^2}{2\lambda^2(N^2 - 4 - 4n)} \left[1 - \frac{15\epsilon_1 R}{4\lambda(N^2 - 4 - 4n)} \cos 2\delta \right],$$

$$B_{1r} = \frac{\epsilon_2 R}{2\lambda} \left[1 - \frac{17\epsilon_1 R}{4\lambda(N^2 - 4 - 4n)} \right] \cos \delta,$$

$$B_{2r} = -\frac{\epsilon_2 R}{2\lambda} \left[1 + \frac{17\epsilon_1 R}{4\lambda(N^2 - 4 - 4n)} \right] \sin \delta.$$

Q_{r0} — частота радиальных колебаний при $\epsilon_2 = 0$, $n = \left(\frac{E}{E_0}\right)^2 - 1$ — показатель среднего магнитного поля, $R = \frac{pc}{eH(R)}$.

Частота радиальных колебаний определяется характеристическим показателем обобщенного уравнения Матье (2) и может быть представлена в виде

$$\cos \frac{2\pi}{N} Q_r = \cos \frac{2\pi}{N} \sqrt{A_r} - \frac{4\pi}{N^3} \frac{\sin \frac{4\pi}{N} \sqrt{A_r}}{\sqrt{A_r}} \cdot \frac{B_{1r}^2 + B_{2r}^2}{1 - \frac{16}{N^2} A_r}. \quad (3)$$

Уравнение (2) и формула (3) показывают, что частота радиальных колебаний существенно зависит как от ϵ_2 , так и от фазового сдвига $\frac{N}{2}$ гармоники (δ).

На рис. 1 изображена зависимость Q_r от δ при $\epsilon_2 = 0,04$ и $0,03$ и зна-

чениях остальных величин, соответствующих проектным параметрам РЦ на конечном радиусе $R_k = 325$ см. Приведем эти значения: $N = 8$; $\lambda = 7,7$ см; $\alpha = 2,05$; $\epsilon_1 = 0,273$; $Q_{r,0} = 1,8$.

Из рис. 1 видно, что при $\delta = \frac{\pi}{2}$ четвертая гармоника с амплитудой $\epsilon_2 = 0,04$ вызывает увеличение частоты радиальных колебаний до $Q_r = 2$, т.е. появляется возможность в РЦ на энергию 700 Мэв использовать резонансный метод вывода частиц на нелинейном резонансе $Q_r = 8/4$.

На рис. 2 сплошной линией представлена зависимость частоты радиальных колебаний от амплитуды 4-ой гармоники при $\delta = \frac{\pi}{2}$ для РЦ на 700 Мэв. Крестиками отмечены значения частот, полученные непосредственным интегрированием полной системы уравнений движения частицы^{13/} на машине Вычислительного центра ОИЯИ.

Изменяя амплитуду 4-ой гармоники, можно изменять радиус нелинейного резонанса и в некоторых пределах регулировать энергию выведенного пучка.

Введение в структуру поля $\frac{N}{2}$ гармоники вызывает дополнительную аксиальную фокусировку, поэтому следует несколько уменьшить амплитуду основной гармоники для сохранения постоянной частоты Q_r . Частота радиальных колебаний Q_r при этом уменьшении практически не изменится.

Таким образом, изменением амплитуд N -ой и $\frac{N}{2}$ -ой гармоник в структуре поля можно регулировать частоты аксиальных и радиальных колебаний.

3. Практическое осуществление модифицированного резонансного вывода в РЦ на 700 Мэв потребует введения дополнительных элементов в магнитную систему на конечных радиусах.

Параметры магнитной системы технического проекта РЦ выбраны на основе расчетов и экспериментов на модели с коэффициентом подобия $k = 6,087^{4/}$. Элементы, формирующие четвертую гармонику магнитного поля, могут быть расположены только в пазах между спиральными шиммами. Эти элементы должны обеспечивать на конечном радиусе ускорителя амплитуду 4-ой гармоники поля $\epsilon_2 = 0,04 - 0,06$ с фазой, близкой к фазе $\beta_2 = \frac{1}{2k} + \frac{\pi}{2}$. Среднее магнитное поле, вносимое при создании 4-ой гармоники, должно быть таким, чтобы его можно было скомпенсировать с помощью системы токовых обмоток РЦ. Проведенные расчеты показали, что использование токовых обмоток, располагаемых в пазах между спиральными шиммами, не обеспечивает получения требуемой зависимости ϵ_2 и β_2 от радиуса. В связи с этим для создания 4-ой гармоники использовалась система стальных шимм с периодичностью $N = 4$. Предварительное определение параметров шимм было произведено на основании расчетов, выполненных в предположении равномерного намагничивания их объема^{15/}. Анализ этих расчетов показал

а) Необходимое значение спиральности шимм существенно зависит от их радиаль-

ной протяженности. Так, для обеспечения значения параметра поля $\lambda_2 = 16,4$ см шиммы должны быть изогнуты по спирали Архимеда с $\lambda = 10,27$ см при радиальной протяженности шимм $\Delta R = 335 - 307,5 = 27,5$ см, и с $\lambda = 7,7$ при $\Delta R = 332,5 - 312,5 = 20$ см.

б) Зависимость фазы основной гармоники поля изменяется несущественно при введении дополнительной системы шимм.

в) Использование шимм с азимутальной шириной $5 - 9$ градусов, позволяет получить требуемую зависимость амплитуды 4-ой гармоники при $\delta = (5/8 \pi \pm 6/8 \pi)$

г) Во всех рассмотренных случаях наблюдается уменьшение амплитуды основной гармоники поля на величину, превышающую требуемое значение.

д) Для получения приемлемого характера радиального распределения среднего поля, амплитуд 4-ой и 8-ой гармоник азимутальная ширина шимм, создающих 4-ую гармонику, должна возрастать с радиусом.

На основании этих расчетов были выбраны параметры системы шимм, формирующих 4-ую гармонику поля. Результаты экспериментов, проведенных с этими шиммами на модели магнитной системы, представлены на рис. 3. В левой части рисунка изображено расположение дополнительных шимм относительно основных и зависимость фазы максимума основной и 4-ой гармоник поля от радиуса. В правой части - приведены среднее поле, амплитуды 4-ой, 8-ой и высших гармоник в зависимости от радиуса.

Видно, что характер распределения амплитуды 4-ой гармоники удовлетворяет требованиям, предъявляемым к системе изменения частоты радиальных колебаний в узкой зоне вблизи предельного рабочего радиуса ускорителя. Полученное превышение среднего поля над резонансным может быть скомпенсировано с помощью токовых обмоток грубой и тонкой коррекции РЦ. Уменьшение амплитуды основной гармоники превышает необходимую величину, поэтому полученная величина амплитуды 8-ой гармоники должна быть увеличена, что может быть обеспечено незначительным изменением профиля системы спиральных шимм.

Проведенный этап исследований показывает возможность осуществления модифицированного резонансного вывода в РЦ на 700 Мэв. Окончательная отработка всех элементов системы вывода, включая магнитный канал, будет проведена на основе дальнейших теоретических исследований динамики движения частиц и экспериментов на модели магнитной системы.

4. Для экспериментального изучения модифицированного резонансного вывода частиц из РЦ в Лаборатории ядерных проблем спроектирован и сооружается электронный аналог релятивистского циклотрона с коэффициентом геометрического подобия $k_{\text{дин}} = 3,2$.

Аналог представляет собой электронный циклотрон, предназначенный для ускорения электронов до энергии 380 кэВ ($\beta = 0,82$), соответствующей энергии протонов 700 МэВ. Магнитное поле создается тремя системами проводников с током, одна из которых обеспечивает необходимую тонкую коррекцию среднего магнитного поля вдоль радиуса. Изменение глубины вариации с радиусом осуществляется соответствующим профилированием вертикального зазора между проводниками. В районе конечного радиуса ускорения

($R_2 = 101,7$ см) предусмотрена обмотка, создающая 4-ую гармонику необходимой величины и фазы с тем, чтобы осуществить нелинейный резонанс $Q_2 = 8/4$ на этом радиусе. Магнитное поле в центре $-1,37$ мТл. Максимумы магнитного поля при $N = 8$ изменяются по спирали Архимеда $r = 19,3\phi$ (см).

Ускоряющая система представляет собой один дуант с углом 90° , работающий на частоте 38,5 МГц, напряжение на котором может изменяться в широких пределах.

Предусмотрен как внутренний источник электронов, так и внешний с энергией инжекции 5,5 кэВ и достаточно большой интенсивностью (несколько миллиампер). Общий вид вакуумной камеры аналога показан на рис. 4.

Намеченные теоретические и экспериментальные исследования позволят, по-видимому, сделать окончательные выводы о методах практического осуществления и возможной эффективности модифицированного резонансного метода вывода для релятивистского циклотрона на энергию 700 МэВ.

Л и т е р а т у р а

1. R.S.Livingston, J.A.Martin. Труды Международной конференции по ускорителям, 1963 г. М., Атомиздат, 1964, стр. 561.
2. А.А. Глазов, Ю.Н. Денисов, В.П. Желепов и др. Труды Международной конференции по ускорителям, 1963 г. М., Атомиздат, 1964, стр. 547.
3. В.П. Дмитриевский, В.В. Кольга, Н.И. Полумордвинова. Препринт ОИЯИ, Р-1981, Дубна, 1965.
4. В.П. Дмитриевский, Н.Л. Заплатин и др. Труды Международной конференции по ускорителям, 1963 г. М., Атомиздат, 1964, стр. 556.
5. В.И. Данилов, Н.Л. Заплатин и др. Препринт ОИЯИ, Р-409, Дубна, 1959.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 августа 1966 г.

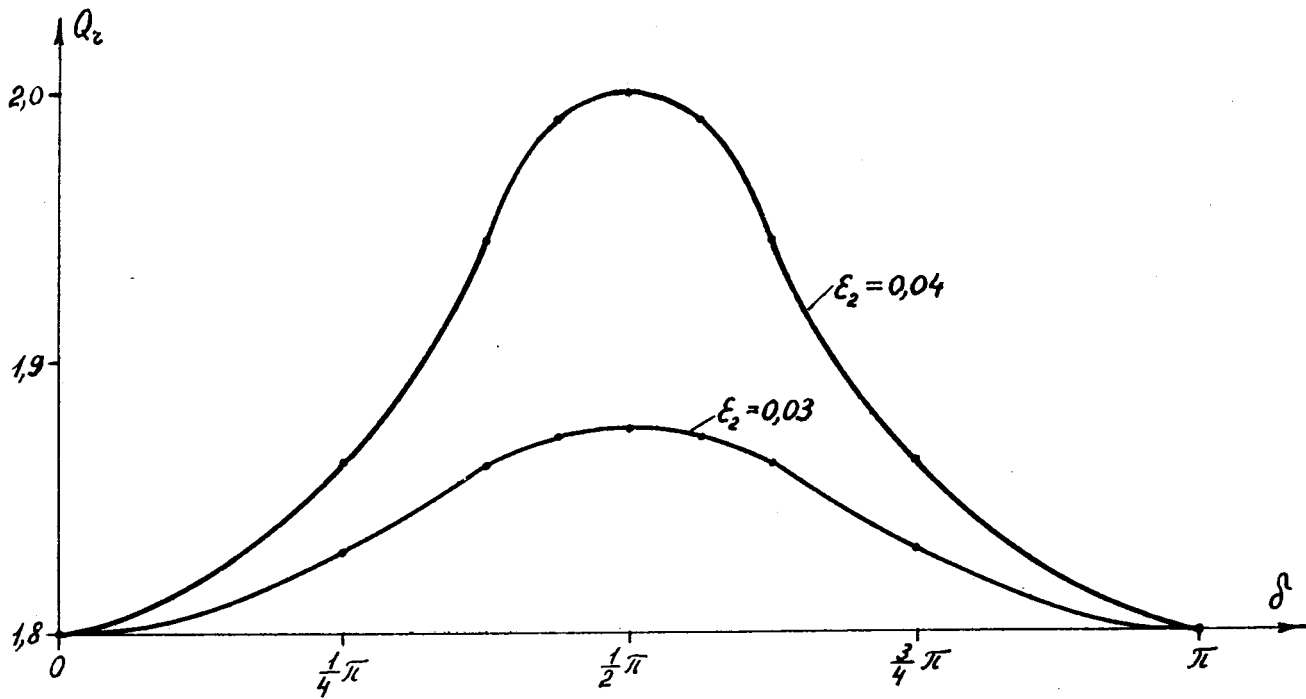


Рис. 1.

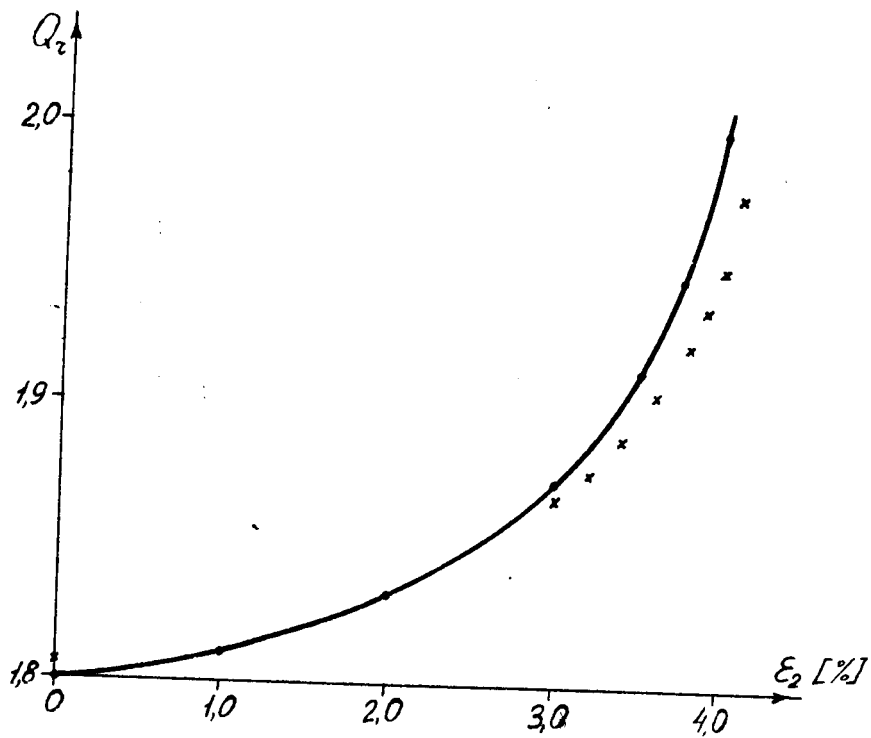


Рис. 2.

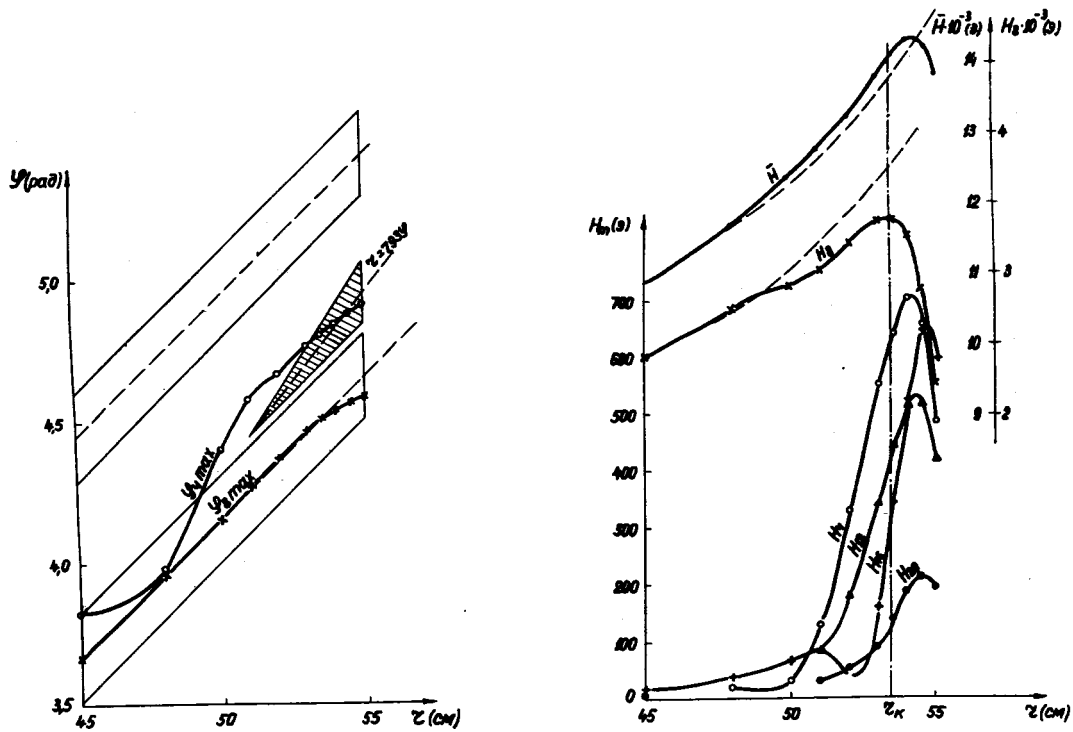


Рис. 3.

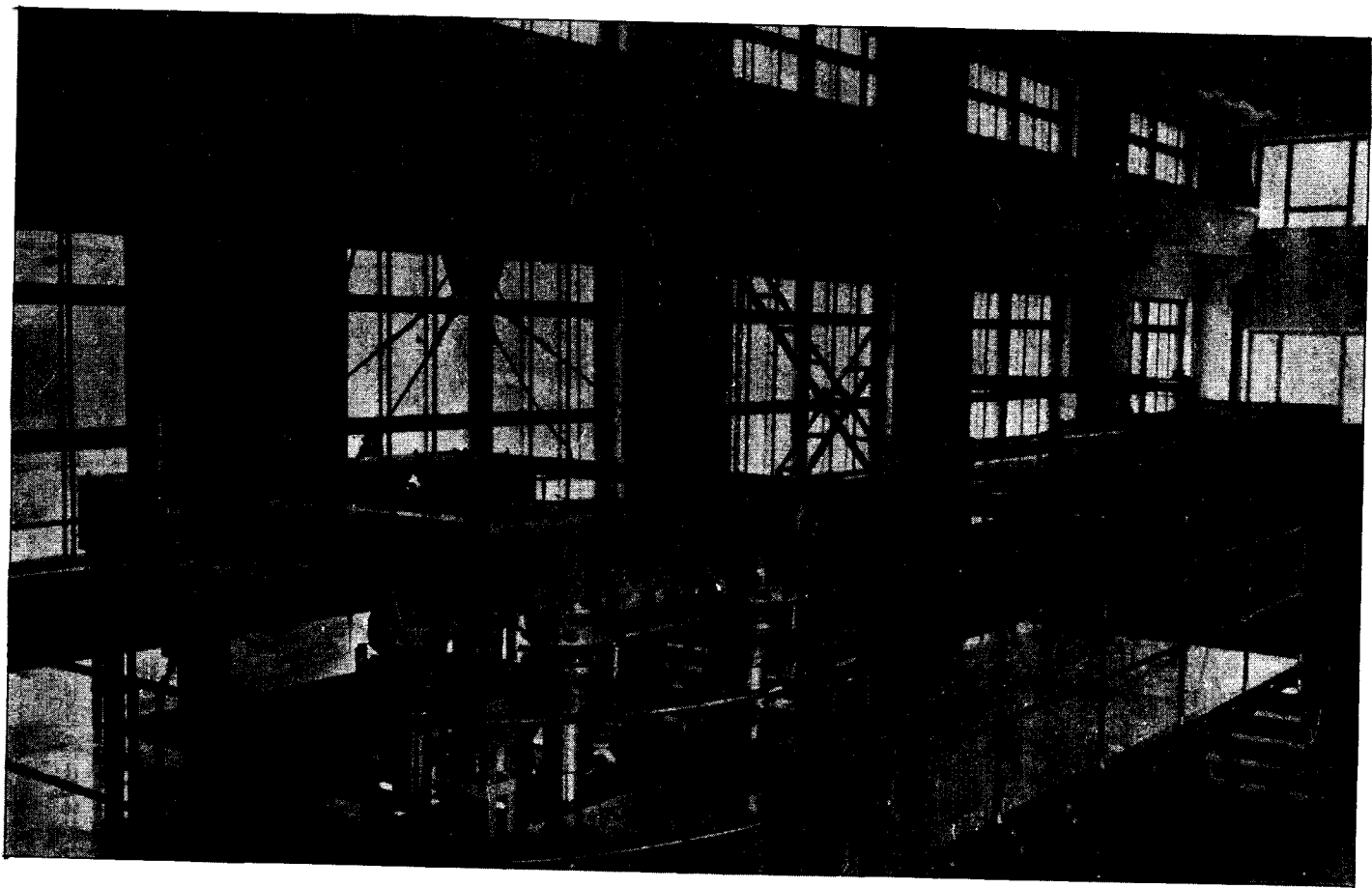


Рис. 4.