

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новоселов Г. П., Агеенков А. Т. «Атомная энергия», 1969, т. 26, вып. 3, с. 230.
2. Новоселов Г. П. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 1, с. 69.
3. Агеенков А. Т. и др. Авт. свид. № 357596. «Бюл. изобрет.», 1972, № 33.
4. Новоселов Г. П. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 5, с. 323.
5. Weber C. «Progr. Nucl. Energy», 1959, ser. V, v. 2, p. 295.
6. Дружинин Л. К. и др. Авт. свид. № 475904. «Бюл. изобрет.», 1978, № 8.
7. Дружинин Л. К. и др. В кн.: Получение покрытий высокотемпературным распылением. М., Атомиздат, 1973, с. 71.

высокие скорости вскрытия. По предварительным оценкам, при диаметре сборки 60—80 мм и мощности электрической дуги до 100 кВт можно достичь скорости вскрытияборок 0,1—0,5 м/мин.

4. Распыляемый материал оболочки имеет форму сферических гранул, что благоприятствует перемещению материала по транспортным коммуникациям. Сферическая форма гранул позволяет также рассматривать вопрос об отделении материала оболочки от керамического топлива механическими методами.

Новый метод вскрытия твэлов с циркониевой оболочкой позволяет резко уменьшить потери урана с оболочкой и обеспечивает высокую скорость процесса.

Поступило в Редакцию 2.VII.75

В окончательной редакции 20.IV.78

УДК 621.384.02

Управление энергетическим распределением пучка на плато магнитного поля протонного синхротрона ИФВЭ

ГУРОВ Г. Г.

Для эффективного использования ускоренного пучка в физических экспериментах и при исследовании ускорителя часто возникает необходимость в изменении энергетического распределения пучка. Для этой цели существуют различные методы: перебор фазы ускоряющего напряжения [1], адиабатическое изменение амплитуды ускоряющего поля [2] и т. д.

В настоящей работе описан простой метод управления энергетическим распределением сгруппированного пучка на плато магнитного поля протонного синхротрона, позволяющий изменять как форму распределения, так и его максимальную ширину за время порядка периода синхротронных колебаний.

Если фазовый размер сгустка намного меньше размера сепаратрисы, то форма сгустка на фазовой плоскости описывается эллипсом:

$$(\Delta E / \delta E)^2 + (\Delta \varphi / \delta \varphi)^2 = 1,$$

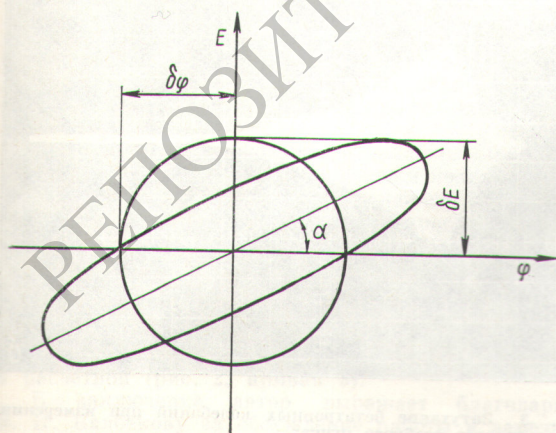


Рис. 1. Дрейф сгустка на фазовой плоскости

где δE и $\delta \varphi$ — максимальные размеры сгустка; ΔE и $\Delta \varphi$ — текущие координаты граничной точки сгустка относительно равновесной частицы.

При выключении ускоряющего поля сгусток деформируется, сохраняя форму эллипса (рис. 1). Если вновь включить ускоряющее поле в той же фазе, что и до выключения, эллипс начнет вращаться и через время

$$\Delta t_{\text{вч}} = 1/2\Omega \arctg 2/\Omega \Delta t_{\text{др}}$$

примет положение, при котором оси эллипса совпадут с осями координат и энергетический разброс сгустка будет минимален. Размеры сгустка $\delta \varphi_{\text{н}}$ и $\delta E_{\text{н}}$ в этот момент равны

$$\delta \varphi_{\text{н}} = \left[1 + \frac{\Omega^2 \Delta t_{\text{др}}^2}{2} - \sqrt{\left(1 + \frac{\Omega^2 \Delta t_{\text{др}}^2}{2} \right)^2 - 1} \right]^{-1/2} \delta \varphi,$$

$$\delta E_{\text{н}} = \frac{\delta E \delta \varphi}{\delta \varphi_{\text{н}}}.$$

Здесь Ω — частота малых синхротронных колебаний; $\Delta t_{\text{др}}$ — время дрейфа сгустка при выключенном ускоряющем поле. При дальнейшем вращении эллипса энергетический разброс сгустка увеличивается и через четверть периода фазовых колебаний принимает максимальное значение, превышающее начальное.

Проведенное выше рассмотрение сделано в предположении линейности фазовых колебаний. В действительности при размерах сгустка, соизмеримых с размером сепаратрисы, фазовые колебания существенно нелинейны. Это ограничивает возможность изменения энергетического разброса пучка, но, с другой стороны, позволяет изменять форму энергетического распределения. На рис. 2 показаны результаты численного расчета для двух характерных случаев преобразования распределения: уменьшение энергетического разброса (2) и выравнивания распределения частиц по энергиям (3). Начальный энергетический разброс сгустка (распределение 1) равен 0,3 энергетического размера сепаратрисы при $\varphi_0 = 90^\circ$. Эти примеры показывают, что

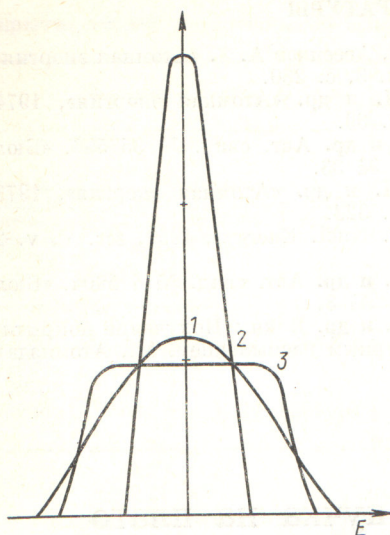


Рис. 2. Расчетные формы энергетического распределения: 1 — начальное распределение; 2, 3 — различные варианты реобразованного распределения

форму распределения, таким образом, можно изменять в широких пределах. Сдвигая фазу ускоряющего поля при повторном выключении, можно также получать несимметричные распределения.

Для реализации рассмотренного способа необходимо проводить коммутацию амплитуды ускоряющего поля за малое время по сравнению с периодом синхротронных колебаний, причем частота и фаза поля при повторном включении должны оставаться прежними. Основной задающий генератор ускоряющей системы протонного синхротрона ИФВЭ [3] вследствие переходных процессов в системе обратной связи по пучку не позволяет проводить подобную операцию. В связи с этим был разработан дополнительный задающий генератор, рассчитанный на работу в узком диапазоне частот (6058—6062 кГц) в конце цикла ускорения. Во время основной части ускорительного цикла этот генератор с помощью цепи фазовой синхронизации привязывается к частоте и фазе основного генератора. В момент выключения ускоряющего поля (начало дрейфа ступков) цепь синхронизации разрывается, но сигнал автоподстройки частоты и фазы сохраняется схемой памяти. Таким образом, дополнительный генератор «запоминает» частоту и фазу ВЧ-поля в момент выключения. Точность запоминания частоты составляет 2—3 Гц, фазы 5—10°. Дрейф частоты в режиме запоминания не превышает 2 Гц/с. ВЧ-напряжение этого генератора подается на ускоряющие устройства при повторном включении ускоряющего поля. В конце цикла ускорения частотный размер пучка $\delta\omega_{\text{п}}$ составляет ~20 Гц

$$\delta\omega_{\text{п}} = \omega_0 \alpha \frac{\delta E}{E_s},$$

где ω_0 — радиочастота; α — коэффициент расширения орбит.

Полученная погрешность запоминания частоты и фазы вызывает при этом незначительную асимметрию фазового движения ступка и мало сказывается на конечном энергетическом распределении.

С использованием разработанной аппаратуры на ускорителе ИФВЭ проводятся исследования методов подавления продольной неустойчивости пучка при взаимодействии его с резонаторами [4]. Порог такой неустойчивости пропорционален квадрату импульсного разброса пучка [5], поэтому уменьшение разброса позволяет имитировать большую интенсивность.

Для определения относительного изменения разброса проводилось резонансное возбуждение когерентных бетатронных колебаний и измерялась скорость их затухания. В области равновесной орбиты частоты бетатронных колебаний частиц практически линейно зависят от отклонения энергии [6], поэтому скорость затухания наблюдаемого сигнала пропорциональна энергетическому разбросу пучка. Разброс уменьшается в 2,7 раза, что близко к значению, полученному численным расчетом. На рис. 3 показаны сигналы бетатронных колебаний при этих измерениях.

Время, необходимое для достижения минимального энергетического разброса, зависит от начального размера ступка и в большинстве случаев ($\delta\phi \geq 20^\circ$) не превышает 1,5 периода синхротронных колебаний. Для ускорителя ИФВЭ значению $\Delta E/E_s = 10^{-3}$ соответствует $\delta\phi = 40^\circ$, при этом время дрейфа — 6 мс, время

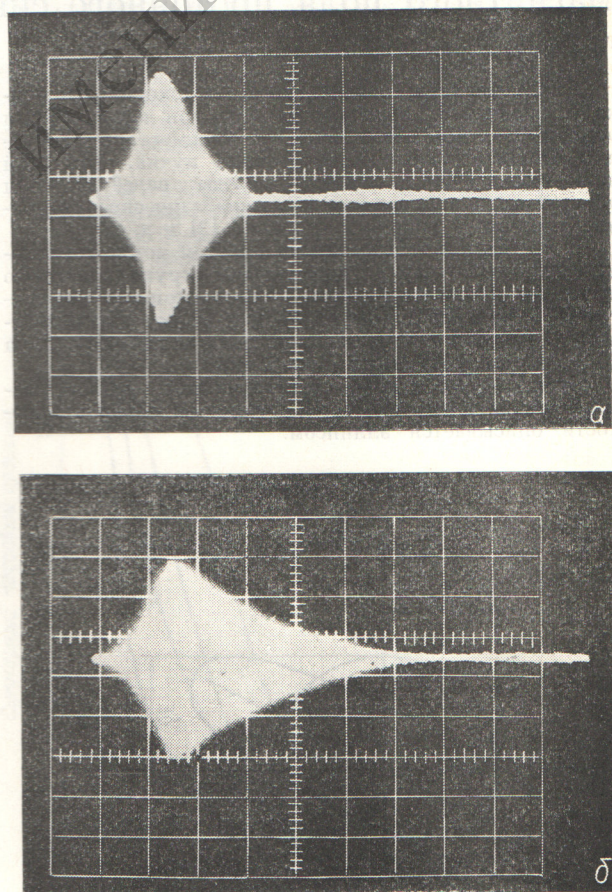


Рис. 3. Затухание бетатронных колебаний при измерениях энергетического разброса пучка:

а — начальный разброс; б — уменьшенный разброс; горизонтальная развертка 100 мкс/дел.

поворота — 0,5 мс (при периоде синхротронных колебаний 10 мс). Для сравнения отметим, что для такого же уменьшения импульсного разброса методом адиабатического сжатия пучка амплитуду ускоряющего поля необходимо понизить в ~50 раз. Существующие ускоряющие станции не позволяют этого сделать из-за ограниченного динамического диапазона [7], а также эффектов нагрузки ускоряющих резонаторов током пучка [8]. Кроме того, для адиабатического сжатия необходимо время порядка нескольких десятков периодов синхротронных колебаний.

Для медленного резонансного вывода протонов энергетическое распределение «естественного» пучка, как правило, не оптимально. Медленный вывод осуществляется перемещением узкой полосы какого-либо резонанса бетатронных колебаний по энергетическому спектру пучка, при этом для более плавного прохождения через резонанс энергетический разброс искусственно увеличивают [9]. Чтобы частицы более равномерно попадали в полосу резонанса, целесообразно распределение сделать плоским. Такой режим преобразования (см. рис. 2, кривая 3) используется на ускорителе ИФВЭ при медленном выводе протонов. Для этого режима время дрейфа равно 4 мс, время поворота — 1,5 мс, т. е. суммарное время около половины периода синхротронных колебаний.

В таких преобразованиях желательно иметь оперативный контроль реально полученного распределения. Из рис. 1 видно, что при деформации сгустка в процессе дрейфа сечения, параллельные оси E , наклоняются и дают проекцию на ось φ . Если при этом длина сгустка значительно превышает его первоначальную, то его фазовое распределение будет в основном определяться энергетическим распределением. В случае первоначально согласованного сгустка малой длины ($\Delta\varphi \ll 2\pi$) форма фазового распределения вообще не зависит от времени дрейфа, изменяется только масштаб зависимости энергетического распределения от фазового. Связь энергетического и фазового распределения в этом случае определяется выражением

$$\rho(\Delta E) = \rho(\Delta\varphi) \frac{E_c}{2\sqrt{\frac{\Omega^2 \Delta t^2 \Delta p}{E_c} + 1}}$$

где E_c — энергетический разброс сепаратрисы.

Это означает, что при измерении энергетического распределения пучка по форме ускоряемого сгустка [10] можно улучшить разрешающую способность при неизменной полосе пропускания канала измерения.

На рис. 4, а показана осциллограмма сигнала сгустка при включенном ускоряющем поле. Сигнал несимметричен, что обусловлено искажениями в канале наблюдения при малых временах нарастания и спада сигнала. На рис. 4, б показан тот же сгусток через 5 мс после выключения ВЧ. В этом случае искажения практически отсутствуют и форма распределения определяется с гораздо большей точностью. Рис. 4, в соответствует режиму выравнивания распределения частиц по энергиям, где форма распределения близка к расчетной (рис. 2, кривая 3).

В заключение автор выражает благодарность В. И. Балбекову за обсуждение работы и замечания.

Поступило в Редакцию 8.IV.77

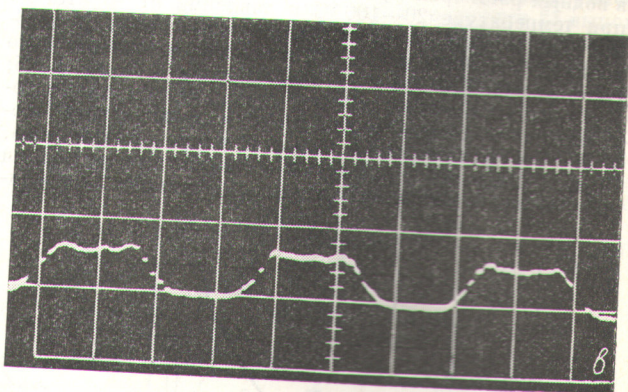
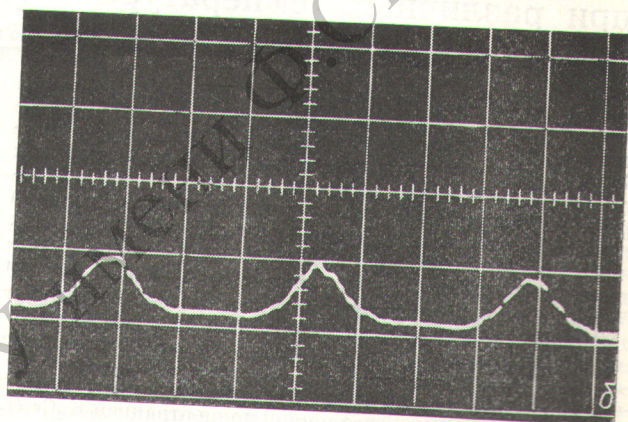
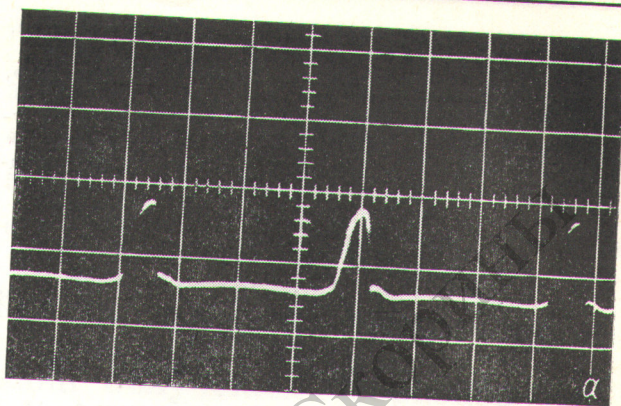


Рис. 4. Осциллограммы сигналов при измерениях формы распределения:

а — сгустки в ВЧ-поле; б — те же сгустки через 5 мс после выключения ВЧ; в — режим выравнивания распределения по энергиям; горизонтальная развертка 50 нс/дел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хени Л. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям. М., «Наука», 1975, т. 1, с. 340.
2. Коломенский А. А., Лебедев А. Н. Теория циклических ускорителей. М., Физматгиз, 1962.
3. Водопьянов Ф. А. и др. Международная конференция по ускорителям. Дубна. М., Атомиздат, 1964, с. 932.

4. Басов А. И. и др. Препринт ИФВЭ 73-77. Серпухов, 1973.
 5. Laslett L., Neil V., Sessler A. «Rev. Sci. Instrum.», 1961, v. 32, N 3, p. 14.
 6. Герцев К. Ф. и др. Препринт ИФВЭ 70-68. Серпухов, 1970.
 7. Горюнов Э. П. и др. Труды I Всесоюзного совеща-

ния по ускорителям. М., ВИНТИ, 1970, т. 11, с. 101.
 8. Nassibian G. SI/Note EL/69-5, 1969.
 9. Edwards H. In: Proc. IX Int. Conf. on High En. Accel., Stanford, California, 1974, p. 447.
 10. Гридасов В. И. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 30, вып. 3, с. 266.

УДК 620.193.669.72

Коррозионная стойкость магний-бериллиевых сплавов в водных растворах бихромата калия и углекислого газа при различных температуре и давлении

ПЕТЛИЦА А. П., ЕРМОЛАЕВ М. И., КАПИТАНОВ В. Ф., ДУГИН Н. А.

Магний-бериллиевый сплав ПМБ-2 применяется как оболочка урановых твэлов некоторых АЭС. После выгрузки из активной зоны твэлы хранятся в течение 2—3 лет (для снижения активности короткоживущих изотопов и отвода остаточного тепловыделения) в 0,5—3%-ных растворах $K_2Cr_2O_7$. На первом этапе хранения кассеты находятся в CO_2 под давлением 2 МПа до двух недель, а затем выдерживаются в долговременных хранилищах при $P_{CO_2} = 50$ кПа. В связи с отсутствием данных об условиях хранения кассет [1—3] возникает необходимость контроля коррозионного поведения магний-бериллиевых сплавов ПМБ-2 и выяснения роли углекислого газа.

Исследовалось коррозионное поведение ПМБ-2 в водных растворах с различной концентрацией $K_2Cr_2O_7$ при температуре 20—100 °С и давлении от 10 кПа до 2 МПа. Образцы для коррозионных испытаний изготовляли из трубок ПМБ-2 следующего химического состава, мас. %: Be 2,0; MgO 0,3; Fe 0,04; C 0,005; Mg — остальное. Эти трубки используются для изготовления оболочек (сплав ПМБ-2 получен методом порошковой металлургии и подвергнут горячей протяжке). После удаления «старой» пленки образцы зачищали наждачной бумагой, обезжиривали в эфире и взвешивали с точностью 10^{-4} г. В процессе испытаний контакт ПМБ-2 с другими металлами и сплавами исключался. Коррозионные показатели определяли по общепринятой методике [4] на десяти параллельных образцах.

Результаты измерений. На рисунке представлена кинетика коррозии ПМБ-2. Согласно полученным данным, при 20—60 °С коррозионные потери ПМБ-2 в растворах $K_2Cr_2O_7$, не содержащих CO_2 , за первые 15—20 ч несколько возрастают и за последующее время (до 400 ч) остаются постоянными на уровне 2—3 г/м². Скорость коррозии ПМБ-2 при тех же условиях снижается в пять раз за 200 ч, а за последующее время (400 ч) падает практически до нуля. Этот факт объясняется [5] образованием на поверхности магний-бериллиевого сплава устойчивой окисной пленки, способной защищать сплав от дальнейших разрушений.

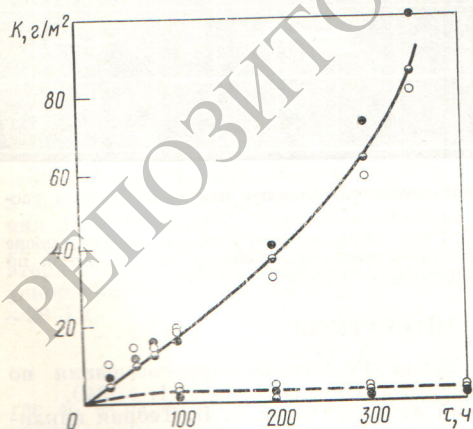
Совершенно иная картина наблюдается в том случае, когда при прочих равных условиях в системе присутствует CO_2 . Уже при давлении CO_2 , равном 10 кПа, коррозионные потери ПМБ-2 при 20—60 °С непрерывно растут, достигая 80—100 г/м² за 350 ч.

Для объяснения такого поведения ПМБ-2 в водном растворе $K_2Cr_2O_7$, содержащем растворенный CO_2 , было показано [6], что при pH = 4,3 вся присутствующая в воде углекислота представлена соединением CO_2 , а при pH = 8,3 ÷ 8,4 углекислота находится в виде ионов HCO_3^- . В приведенных опытах установлено изменение pH от 4,3 до 7,8, которое приводит к увеличению доли ионов HCO_3^- и автокаталитическому увеличению скорости коррозии ПМБ-2.

Коррозионные разрушения сплава ПМБ-2 в системе $H_2O - K_2Cr_2O_7 - CO_2$ сопровождаются выделением водорода (определяли хроматографически) и изменением состава среды. Поверхность сплава покрывается рыхлой пленкой темно-серого цвета, которая отслаивается за счет механического воздействия пузырьков водорода. Видимо, наряду с реакцией $3Mg + K_2Cr_2O_7 + 7H_2O + CO_2 = 3Mg(OH)_2 + 2Cr(OH)_3 + KOH + KHSO_3$ идет реакция $Mg + 2H_2O = Mg(OH)_2 + H_2$.

Измерения показали, что после экспозиции 620 ч при температуре 20 °С концентрация $K_2Cr_2O_7$ в системе снизилась с 3 до 2,5% (при отношении объема раствора к суммарной поверхности образцов 7 см³/см²).

Проведенные опыты свидетельствуют, что при температуре 20 °С, давлении CO_2 10 кПа снижение и повышение концентрации $K_2Cr_2O_7$ относительно 3%-ного раствора $K_2Cr_2O_7$ практически не сказываются на стой-



Зависимость коррозии ПМБ-2 от времени в водном 3%-ном растворе $K_2Cr_2O_7$ при температуре 20 (○), 40 (◻) и 60 °С (●): — — под давлением CO_2 , равным 10 кПа; - - - без CO_2