

**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна**

В 751

P9-88-472 *e*

**С.Б.Ворожцов, А.А.Глазов, В.П.Дмитриевский,
Е.Н.Заплатин, М.Б.Калинкина, В.А.Кочкин,
Б.Н.Марченко, Л.М.Онищенко, Н.Г.Шакун,
П.Т.Шишлянников**

**РАСТЯЖКА ПУЧКА ФАЗОТРОНА ОИЯИ
В МИНИМУМЕ ЧАСТОТНОЙ ПРОГРАММЫ**

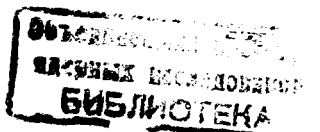
1988

В фазотроне ОИЯИ¹¹ для временной растяжки ускоренного пучка протонов используется способ синхротронного доускорения с помощью дополнительного ускоряющего элемента — С-электрода. В момент достижения частицами определенного радиуса происходит отключение ускоряющего напряжения основного дуанта. Доускорение частиц до радиуса выводной системы происходит с необходимой скоростью по определенному закону напряжением С-электрода с целью получения непрерывного во времени пучка. Некоторые параметры системы растяжки приведены в таблице.

Таблица

Частота среза V_d и макс. частота С-программы $f_{d\text{ cut}} = f_{c\text{ max}}$ (МГц)	14,6
Радиус R_c при $f_{d\text{ cut}}$, (см)	264,3
Кинетическая энергия W_c при $f_{d\text{ cut}}$, (МэВ)	652,96
Амплитуда ВЧ напряжения на С-электроде V_c , (кВ)	15-20
Угловой размер С-электрода θ_c	60°
Диапазон частот $\Delta f_c = f_{c\text{ max}} - f_{c\text{ min}}$, (кГц)	60
Мощность ВЧ генератора, (кВт)	15

Первым режимом временной растяжки, реализованным на фазотроне ОИЯИ, был режим перезахвата из предварительно остановленного пучка (ППОП)¹³. Этот режим характеризуется возрастанием к моменту перезахвата фазовой площади, занятой пучком, связанным с распределением частиц по всем фазам в диапазоне $(0-2\pi)$ при отсутствии напряжения на дуанте, а также увеличением энергетического размера пучка при конечном времени снятия напряжения дуанта $2\tau > 45$ мкс (порядка периода одного фазового колебания). Для перезахвата пучка системой растяжки в этом режиме требуются большие значения амплитуд напряжения на С-электроде (теоретически, согласно¹³, $V_c > 30$ кВ). Поэтому режим ППОП предполагался к использованию лишь для пониженных значений $V_d(t)$. Однако реально он был применен и для рабочей



характеристики $V_d(t)$ при $V_c=14$ кВ, что повлекло за собой снижение эффективности перезахвата до (30-60)%. Снижение V_d в конце цикла ускорения с целью согласования с напряжением на С-электроде оказалось невозможным из-за фазовых потерь при $df_d/dt \neq 0$.

1. СИСТЕМА БЫСТРОЙ ОСТАНОВКИ ПУЧКА

Для увеличения интенсивности растянутого пучка при работе ускорителя в таких условиях применена система быстрой остановки пучка. Блок-схема этой системы представлена на рис. 1. Дуантное напряжение, снимаемое с измерителя дуантного напряжения (ИДН), через линию задержки (ЛЗ) поступает на схему "И". На второй вход схемы "И" поступает строб (РАСТ) длительностью 40 мкс. Этот строб с помощью прецизионной цифровой задержки должен во времени совпадать с интервалом прохождения выводных частот дуантного напряжения. На частотах вывода временная производная частоты составляет 1,5 МГц/мкс, т.е. на выходе схемы "И" появится напряжение с частотной программой дуантного напряжения на выводных частотах. Далее сигнал поступает на схему "ИЛИ", которая канализует в фидер связи напряжения в последовательности "Напряжение ИДН — напряжение задающего генератора растяжки". Регулируемая линия задержки ЛЗ (0,5-70 нс) позволяет изменять фазу сигнала ИДН от 0 до 360°. Таким образом, выбрав фазу этого сигнала, сдвинутую на 180°, сигнал с ИДН можно превратить в тормозящее пучок напряжение. Результирующее воздействие на пучок тормозящего и ускоряющего напряжений, равных по

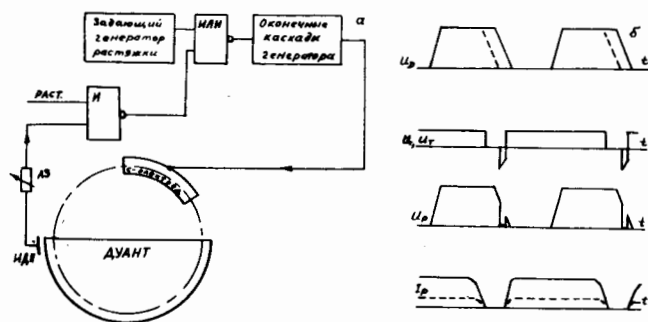
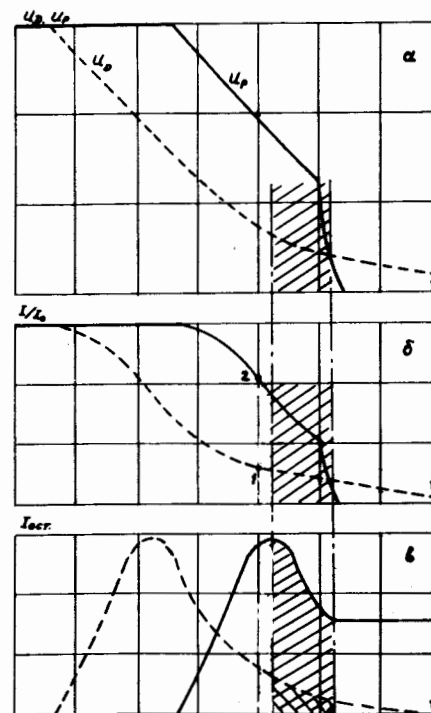


Рис. 1. а — блок-схема системы быстрой остановки пучка; б — диаграммы сигналов на дуанте U_D , С-электроде U_C , тормозящего напряжения U_T , результирующего ускоряющего напряжения U_P , сигналов растянутого пучка I_P

Рис. 2. Диаграммы спада дуантного U_D и результирующего U_P напряжений, относительной величины выведенного тока I/I_0 , предварительно остановленного пучка $I_{ост}$.



абсолютной величине, эквивалентно отсутствию (провалу до нуля) дуантного напряжения. На рис. 16 показаны огибающие напряжений на дуанте (U_D), С-электроде (U_C и U_T), "результирующее" напряжение (U_P), а также ток пучка.

На рис. 2 представлены временные диаграммы ускоряющего дуантного (U_D) и результирующего (U_P) напряжений, выведенного и остановленного пучков. Пунктирные линии соответствуют остановке пучка без тормозящего напряжения на С-электроде. Видно, что без тормозящего напряжения в силу большого времени спада напряжения дуанта остановка пучка без заметного вывода наружу нерастянутого пучка требует более раннего отключения дуантного напряжения, что приводит к остановке части пучка из-за фазовых потерь на более ранней стадии ускорения. Экспериментально диаграмму выведенного пучка (рис. 2б) можно получить только путем перемещения по радиусу всех элементов выводной системы, что осуществить не представляется возможным. Эту диаграмму получили следующим образом: на двухлучевой осциллограф подавались сигналы тока выведенного нерастянутого пучка и ускоряющего напряжения на интервале его спада. Относительно начала развертки осциллографа импульс выведенного тока оставался неподвижным независимо от момента начала спада дуантного напряжения. При различных значениях момента начала спада фиксировались амплитуда тока и соответствующее началу вывода ускоряющее напряжение. Заштрихованная зона обозначает время, в течение которого С-электрод взаимодействовал бы с частью остановленного пучка, если бы его частотная программа совпадала с дуантной. Такое представление позволяет наглядно представить механизм остановки пучка, его захвата в доускорение, не прибегая к временным масштабам. Использование такой системы быстрой остановки пучка позволило повысить интенсивность растянутого пучка в 4-5 раз.

2. РЕЖИМ РАСТЯЖКИ ПУЧКА ПРИ $df_d/dt \rightarrow 0$

Для устранения недостатков режима ППОП было предложено работать при $df_d/dt = 0$ в момент перезахвата пучка С-электродом. При этом, согласно¹³, можно допустить уменьшение амплитуды ускоряющего напряжения $V_d(t)$ в конце цикла ускорения без сопутствующих фазовых потерь. В результате снижается энергетический разброс пучка к моменту его перехвата С-электродом (рис. 3), что позволяет существенно повысить эффективность перезахвата для заданной амплитуды напряжения на С-электроде V_c . На рис. 3 кривые 1 относятся к режиму растяжки ППОП, а кривые 2 соответствуют режиму $df_d/dt = 0$. Кривая 12 характеризует энергетический разброс пучка при $V_{d1}(t)$ и $f_{d2}(t)$. Таким образом видно, что при переходе от $V_{d1}(t)$ к $V_{d2}(t)$ энергетический разброс в пучке теоретически уменьшается почти в два раза. Характерной особенностью обоих режимов является отсутствие необходимости в синхронизации фаз ВЧ для дуантной и С-электродной программ, т.к. воздействие по времени этих ускоряющих систем на пучок происходит раздельно. Теоретическое сравнение этих режимов показывает, что для примерно одинаковой скважности (около 60%) эффективность перезахвата должна вырасти в два раза.

Зависимость рабочей частоты от угла поворота ротора вариатора

Зависимость частоты ускоряющего дуанта от угла поворота вариатора до (1) и после (2) изменения емкости вариатора.

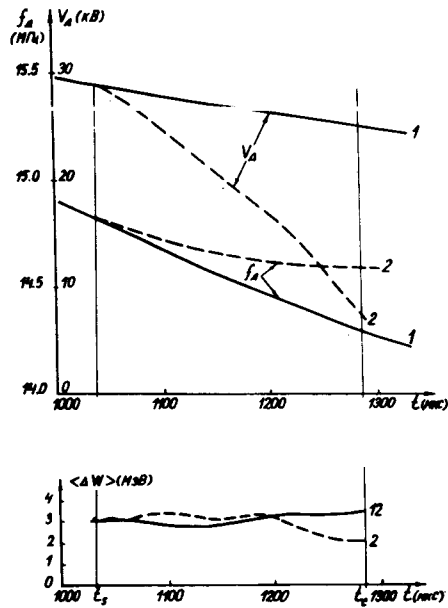


Рис. 3. Зависимости напряжения на дуанте V_d , частоты ускоряющего поля f_d и энергетического разброса ΔW от времени в районе частот вывода.

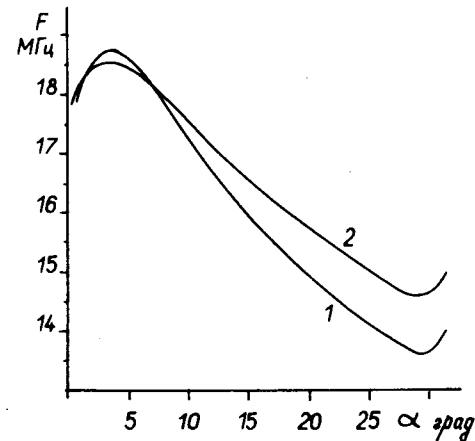


Рис. 4. Зависимость частоты ускоряющего дуанта от угла поворота вариатора до (1) и после (2) изменения емкости вариатора.

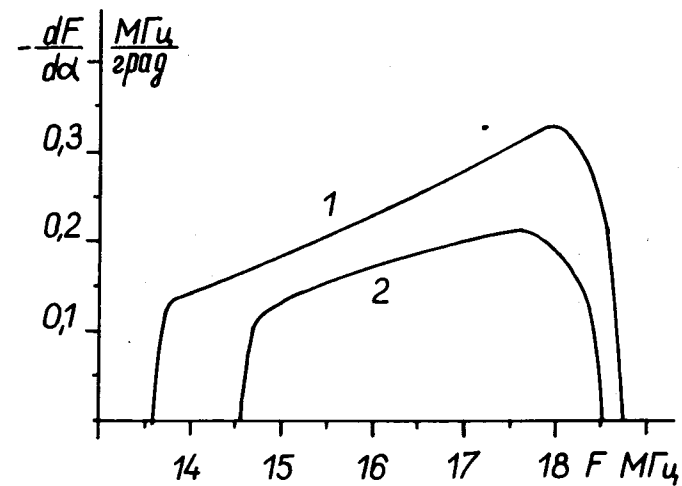


Рис. 5. Производная частоты по углу поворота ротора вариатора в диапазоне частот фазотрона до (1) и после (2) изменения емкости вариатора.

ВЧ системы фазотрона ОИЯИ представлена на рис. 4 (кривая 1). Практическая реализация режима с $df_d/dt \rightarrow 0$ в момент перезахвата пучка С-электродом заключается в уменьшении емкости вариатора. Путем уменьшения числа пластин статорных пакетов на 32% получено значение нижней частоты диапазона около 14,5 МГц. Однако одновременно образовался значительный (до 800 кГц) запас частот, больших частоты захвата пучка в процесс ускорения (18,2 МГц), который является нежелательным, поскольку увеличивает скважность работы ускорителя. Поэтому, используя переменные емкости земля — дуант (плоские триммеры), установленные симметрично относительно роторов вариатора, верхняя частота ВЧ-системы была понижена до 18,5 МГц (рис. 4, кривая 2). Диапазон перестройки частоты с помощью триммеров составляет 500 кГц на верхней частоте и 100 кГц на нижней. Таким образом, эти триммеры позволяют осуществлять точную настройку резонансной системы на режим с $df_d/dt \rightarrow 0$. На рис. 5 представлены зависимости частотной производной по углу поворота ротора вариатора до (кривая 1) и после (кривая 2) изменений. Видно, что производная на частоте захвата частиц уменьшилась на 40%, а длительность рабочего хода увеличилась почти в полтора раза и стала составлять 61% от периода ускорения.

Нежелательным последствием при этом является то, что при уменьшении числа статорных пластин уменьшается зона подсоединения вариатора к резонансной линии, и, как следствие, увеличивается напряжение

на вариаторах. Однако равномерное расположение оставшихся пластин по статору позволило свести увеличение напряжения на вариаторах до минимума (рис. 9, кривая 1 — до изменений, кривая 2 — после). Максимальное увеличение напряжения меньше 3%.

Тем не менее, работа при точном выполнении условия $df_d/dt = 0$ невозможна, поскольку реальное время спада напряжения дуанта составляет примерно 150 мкс, что значительно превышает время, в течение которого практически выполняется условие $df_d/dt = 0$. А это означает, что некоторые частицы, не успев достигнуть радиуса С-электрода, при наступлении действия обратного хода основной частотной программы начинают смещаться по радиусу к центру ускорителя. Поэтому реально начало работы системы растяжки приходится сдвигать по времени относительно момента $df_d/dt = 0$. Тем не менее, проведенные изменения частотной программы позволили в районе радиуса вывода резко умень-

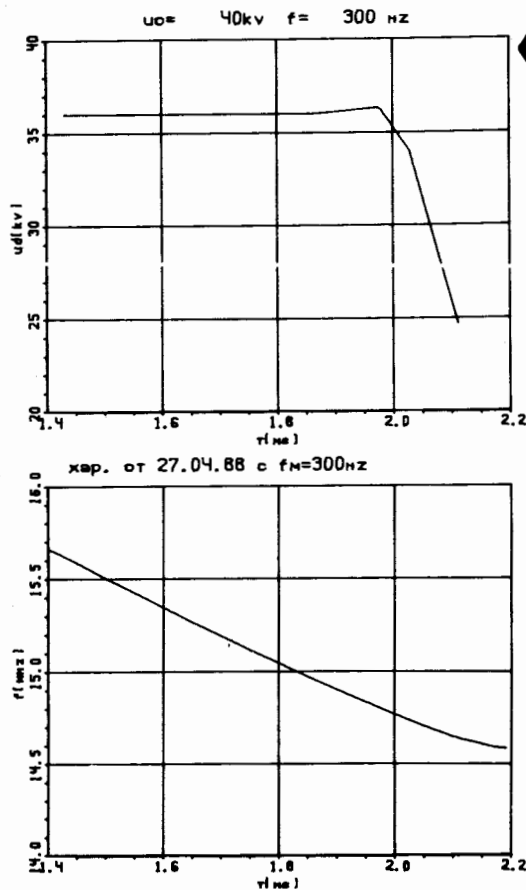


Рис. 6. Временные диаграммы дуантных напряжения и частоты в области вывода фазотрона.

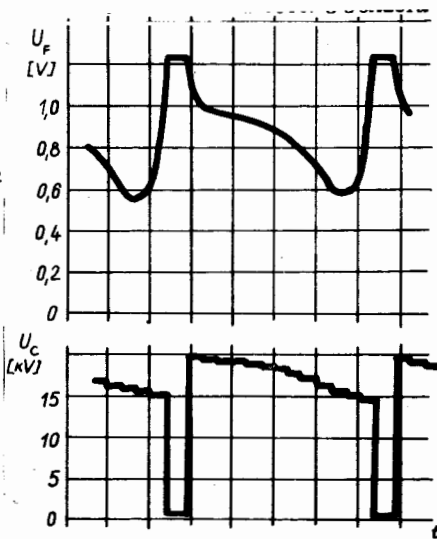
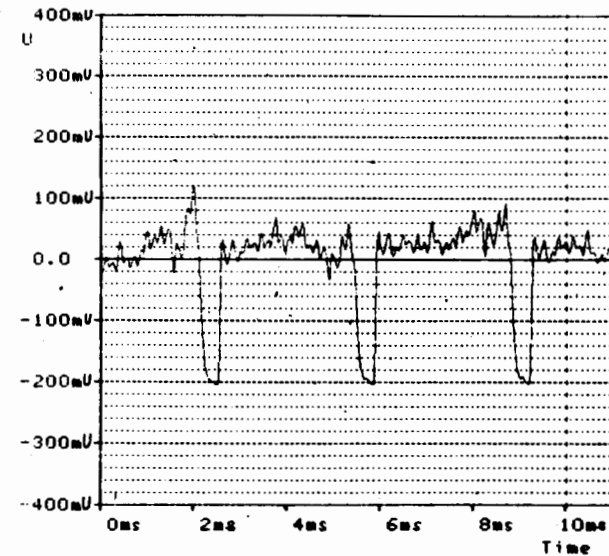


Рис. 7. Частотная U_F и амплитудная U_C характеристики С-электрода.



Peak+:	Line	Time	Peak-:	Line	Time
Amplitude	104	2.03ms	Amplitude	130	2.54ms
118.2mU			-203.4mU		

Рис. 8. Осциллограмма выведенного растянутого пучка фазотрона.

шить напряжение на дуанте. На рис. 6 представлен временной интервал осциллограмм напряжения и частотной характеристики дуанта в области работы системы растяжки. Частотная U_F и амплитудная U_C характеристики С-электрода приведены на рис. 7.

Однако с помощью прямых измерений невозможно точно определить экспериментально полученный коэффициент, перезахвата по выведенному пучку, поскольку при переходе работы ускорителя с режима растяжки на нерастянутый пучок, необходима перестройка ВЧ системы в области частот вывода. Расширение частотного диапазона основной дуантной про-

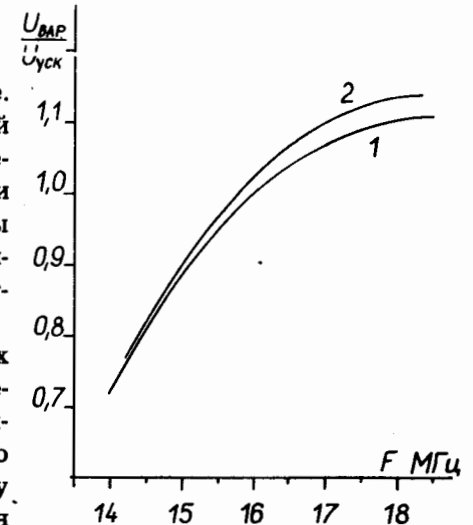


Рис. 9. Частотные характеристики напряжений на вариаторе относительно ускоряющего до (1) и после (2) изменения емкости вариатора.

граммы с помощью триммеров до частоты вывода 14,41 МГц одновременно приводит к повышению верхней частоты диапазона и к увеличению производной на частоте захвата 18,2 МГц. А это, в свою очередь, изменяет условия захвата пучка в процесс ускорения. Коэффициент перезахвата, измеренный по соотношению токов на $R = 50$ см и выведенного пучка, составляет (75-80)%, что соответствует его увеличению примерно в 1,5 раза. На рис. 8. представлена осциллограмма выведенного растянутого пучка фазотрона. Длительность пучка составляет 85% от периода работы ВЧ системы, что определяется схемой автоматического выбора длительности растяжки модулятора генератора С-электрода¹². Амплитудная неоднородность пучка около 25%. Интенсивность выведенного растянутого пучка при рутинной работе фазотрона составляет ~ 2 мкА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аленицкий Ю.Г. и др. Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1985, т.1, с.289.
2. Глазов А.А. и др. Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1987, т.2, с.242.
3. Ворожцов С.Б. и др. ОИЯИ, Р9-12-882, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 июня 1988 года.

Ворожцов С.Б. и др.

Р9-88-472

Растяжка пучка фазотрона ОИЯИ
в минимуме частотной программы

В фазотроне ОИЯИ для временной растяжки ускоренного пучка протонов используется способ синхроциклотронного доускорения с помощью дополнительного ускоряющего элемента С-электрода. С целью увеличения эффективности перезахвата пучка С-электродом проведена модификация ускоряющей системы фазотрона так, что в момент вывода частиц частота ускоряющего напряжения принимает минимальное значение, то есть временная производная частотной программы основного дуанта приближается к нулю. Одновременно оптимизирован режим работы системы растяжки. Проведены численное моделирование и эксперименты по растяжке пучка в этих условиях. В результате коэффициент перезахвата пучка увеличился примерно в 1,5 раза и составил (75-80)%.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод авторов

Vorozhtsov S.B. et al.

Р9-88-472

Stretching of JINR Phasotron Beam
at Minimum of Frequency Program

The method of synchrocyclotron postacceleration by means of an additional accelerating element — C-electrode — is used in JINR Phasotron for time stretching of accelerated proton beam. To increase the beam capture efficiency by the C-electrode the Phasotron accelerating system was modified in such a way, that the accelerating voltage frequency was a minimum at the moment of particle extraction, i.e. the dee frequency program time derivative achieves zero. At the same time, the working regime of the stretching system was optimised. Numerical simulation and experiments on beam stretching under these conditions were carried out. As a result, the beam capture coefficient increased approximately 1.5 times reaching the level of (75-80)%.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988