

СЗУ502

K-138

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



3/IV 78
9 - 11188

1526 / 2-78

Р.Б.Кадыров, В.А.Попов, В.Л.Степанюк

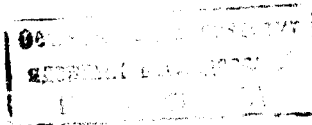
ИНЖЕКЦИЯ ЧАСТИЦ В СИНХРОФАЗОТРОН
С ВЫРАВНИВАНИЕМ И МОДУЛЯЦИЕЙ ЭНЕРГИИ

1978

9 - 11188

Р.Б.Кадыров, В.А.Попов, В.Л.Степанюк

**ИНЖЕКЦИЯ ЧАСТИЦ В СИНХРОФАЗОТРОН
С ВЫРАВНИВАНИЕМ И МОДУЛЯЦИЕЙ ЭНЕРГИИ**



Кадыров Р.Б., Попов В.А., Степанюк В.Л.

9 - 11188

Инжекция частиц в синхрофазотрон с выравниванием и модуляцией энергии

Проведена теоретическая оценка эффективности инжекции протонов в синхрофазотрон ОИЯИ при энергии 20 МэВ с выравниванием и модуляцией энергии. Оптимизация параметров инжекции сделана с помощью ЭВМ БЭСМ-6. Приведены оптимальные параметры выравнивателя и модулятора энергии. Обсуждаются особенности инжекции дейтронов и легких ядер.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Kadyrov R.B., Popov V.A., Stepanyuk V.L.

9 - 11188

Injection of Particles into a Synchrotron with Energy Debunching and Modulation

Theoretical evaluation of efficiency of injection of protons into a synchrotron at 20 MeV with energy debunching and modulation has been performed. Optimization of injection parameters was performed using the BESM-6 computer. Optimal parameters of the energy debuncher and modulator are given. The characteristic features of deuterons and light nuclei are discussed.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energy, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

Для успешной инжекции в синхрофазотрон необходимо, чтобы вводимые при помощи магнитооптической системы внутрь вакуумной камеры частицы обходили все препятствия на последующих оборотах. Наибольшее число частиц будет захвачено и ускорено до конечной энергии в том случае, если найдено и выдержано определенное соотношение между параметрами вводимого пучка и выбранного режима ускорения. Будем называть параметрами инжекции следующую систему величин, относящихся непосредственно к пучку: W_0 - равновесная энергия инжектируемых частиц; $\pm \Delta p/p$ - разброс по импульсам; $\pm \gamma$ - разброс угла между вектором скорости частицы и касательной к орбите инжекции; $\pm b$ - разброс радиального положения частиц при влете / b - полуширина инфлектора/, а также величины, характеризующие выбранный режим инжекции: B_0 - величина магнитного поля в момент начала инжекции; $t_{и}$ - время инжекции; σ - коэффициент захвата в режим ускорения; $\tau_{эфф}$ - эффективность инжекции; m - глубина модуляции энергии инжектируемого пучка.

Нахождению условий оптимального захвата частиц в синхрофазотрон ОИЯИ посвящены работы теоретического характера^{/1-3/} и экспериментальные, с описанием действующих установок^{/4-6/}. В работе^{/6/} приведены оптимальные параметры инжекции для линейного ускорителя ЛУ-9 /выходная энергия 9 МэВ/ с выравниванием и модуляцией энергии в соответствии с ростом магнитного поля за время инжекции.

С запуском линейного ускорителя на энергию 20 МэВ условия инжекции изменились. Увеличение энер-

гии инжекции приводит к уменьшению шага сворачивания мгновенной орбиты в кольце синхрофазотрона, что равносильно уменьшению скорости нарастания магнитного поля. Нетривиальность этого положения подчеркивается в работе ^{13/}. Увеличение энергии инжекции при неизменной скорости нарастания магнитного поля ухудшает условия обхода инфлектора, в результате чего возрастают требования к параметрам инжектируемого пучка. При указанных условиях максимальная величина коэффициента захвата σ зависит от степени оптимизации параметров режима инжекции с учетом реальных характеристик пучка на входе в камеру синхрофазотрона. В настоящей работе сделана теоретическая оценка эффективности инжекции при энергии 20 МэВ с выравниванием и модуляцией энергии.

1. ВЫРАВНИВАТЕЛЬ И МОДУЛЯТОР ЭНЕРГИИ ЛУ-20

Для повышения интенсивности ускоряемого пучка необходимо, во-первых, уменьшить энергетический разброс вводимых частиц и, во-вторых, промодулировать их энергию в определенных пределах. В настоящее время обе эти функции выполняет высокочастотный резонатор, принцип действия которого и техническое устройство описаны в работе ^{16/}. Расстояние l_d от выхода линейного ускорителя до места установки резонатора, называемое участком дрейфа, выбрано равным 9 м.

На рис. 1 показана последовательность изменения продольного фазового объема протонных сгустков в процессе сужения разброса по импульсам. Там же нанесены границы области захвата по импульсам в синхрофазотрон, которые составляют $\pm 0,15\%$. Как видно из рисунка, уменьшение разброса по импульсам с $0,7\%$ до $0,2\%$ на данном участке дрейфа происходит при амплитуде высокочастотного напряжения на щели резонатора, равной 300 кВ /эллипс 3/. Однако для того чтобы обеспечить модуляцию энергии на 3% путем изменения фазы напряжения на резонаторе от -45° до $+45^\circ$ за время импульса $t_{и} \sim 900$ мкс, амплитуда напряжения должна

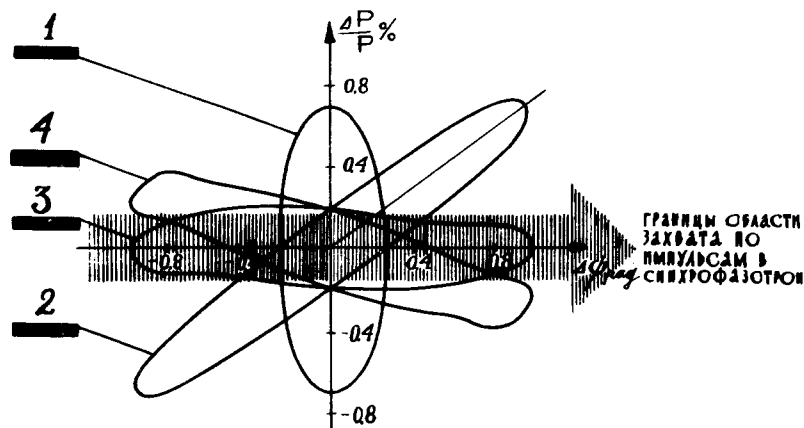


Рис. 1. Процесс сужения разброса по импульсам в продольном сгустке; 1 - первоначальный фазовый объем сгустка $\Delta p/p = \pm 0,7\%$; 2 - изменение фазового объема после дрейфа на участке $l_d = 9$ м; 3 - фазовый объем сгустка после прохождения щели выравнивателя при амплитуде напряжения на щели 300 кВ; $\Delta p/p = \pm 0,2\%$; 4 - фазовый объем сгустка после прохождения щели выравнивателя при амплитуде напряжения на щели 430 кВ, $\Delta p/p = \pm 0,4\%$.

быть повышена до 430 кВ. В этом случае фазовый объем сгустка обозначен эллипсом 4, разброс по импульсам составляет $\pm 0,4\%$.

Представляет интерес рассмотрение процесса сужения разброса по импульсам не для всего пучка инжектора в целом, а только для его ядра, разброс по импульсам в котором равен $\pm 0,4\%$. Число частиц в ядре составляет $80 \pm 85\%$ /если принять гауссово распределение частиц по импульсам в сгустке/.

На рис. 2 представлен процесс одновременного выравнивания спектра и модуляции энергии для частиц ядра. Амплитуда напряжения на щели резонатора выбрана равной 430 кВ, а фаза изменяется от -45° до $+45^\circ$. Как видно из рисунка, наилучшее сужение разброса по импульсам происходит на краях, когда значения фаз близки к 45° .

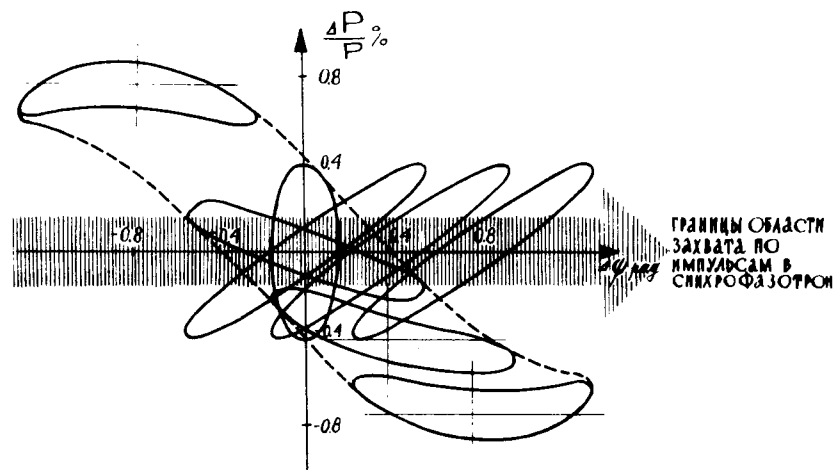


Рис. 2. Процесс одновременного выравнивания спектра и модуляции энергии для протонных сгустков с начальным разбросом импульсов $\Delta p/p = \pm 0,4\%$. Амплитуда напряжения на щели резонатора 430 кВ, фаза напряжения изменяется от -45° до $+45^\circ$.

На рис. 3 показан аналогичный процесс, но при амплитуде напряжения 300 кВ. Эта амплитуда соответствует оптимальному выравниванию энергии при нулевой фазе. Чтобы получить тот же коэффициент модуляции энергии, фазу напряжения на щели резонатора надо изменять от -60° до $+60^\circ$. Сужение разброса по импульсам происходит лучше, чем в случае, представленном на рис. 2. В диапазоне изменения фаз от -45° до $+45^\circ$ $\Delta p/p \approx 0,15\%$, и лишь в области изменения фаз от 45° до 60° $\Delta p/p$ увеличивается до $\pm 0,2\%$.

2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНЖЕКЦИИ

Расчет эффективности инжекции сводился, как и в работе /6/, к максимизации функции

$$\tau_{\text{эфф}} = \sigma \cdot t_{\text{и}}$$

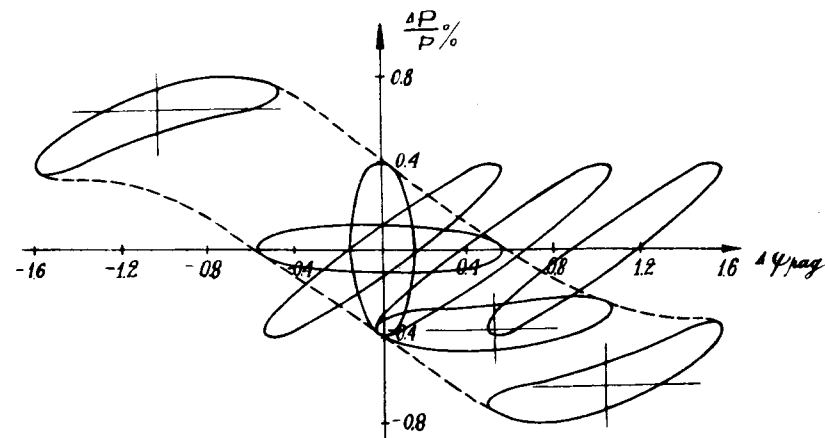


Рис. 3. Процесс одновременного выравнивания спектра и модуляции энергии для протонных сгустков с начальным разбросом импульсов $\Delta p/p = \pm 0,4\%$. Амплитуда напряжения на щели резонатора 300 кВ, фаза напряжения изменяется от -60° до $+60^\circ$.

где $\tau_{\text{эфф}}$ - эффективность инжекции, $t_{\text{и}}$ - время инжекции, $\sigma = \sigma_{\beta} \cdot \sigma_s$ - коэффициент захвата частиц в режим ускорения, σ_{β} - коэффициент захвата в бетатронный режим ускорения, σ_s - коэффициент захвата в синхротронный режим.

Распределение частиц по углам, сечению сгустка и импульсам аппроксимировались распределением Гаусса, причем максимальные отклонения составили: $\gamma = 3 \cdot 10^{-3}$ рад, $b = \pm 2,5$ см, $\Delta p/p = \pm 0,4\%$ /рассматривалось только ядро пучка/. Задача оптимизации параметров инжекции решалась на ЭВМ. Результаты расчетов приведены в таблице. В п.1 таблицы приведены результаты расчета режима инжекции без выравнивания и модуляции энергии для ядра пучка / $\Delta p/p = \pm 0,4\%$ /, в п.2 - с выравниванием и модуляцией энергии для всего пучка /см. рис. 1/, в п.3 - с выравниванием и модуляцией энергии для ядра пучка / $\Delta p/p = \pm 0,15\%$ /.

В последнем случае разброс по импульсам соответствует границам области захвата в синхрофазотрон.

Таблица

N	$\frac{\Delta p}{p}, \%$	m, %	$t_{и}, \text{мкс}$	$V_0, \text{Гс}$	σ	$\tau_{эфф}, \text{мкс}$
1	$\pm 0,4$	-	408	227,32	0,096	39
2	$\pm 0,4$	3	927	228,92	0,071	66
3	$\pm 0,15$	3	858	22	0,156	134

Таким образом, применение выравнителя - модулятора энергии позволяет повысить эффективность инжекции протонов в синхрофазотрон примерно в 3 раза.

3. ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕКЦИИ ДЕЙТРОНОВ И ЯДЕР ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящее время на синхрофазотроне осуществляются режимы ускорения дейтронов, а также ядер легких элементов, для которых отношение заряда к массе равно 0,5. Поэтому вопрос инжекции таких ядер представляет практический интерес.

Предварительное ускорение дейтронов ведется в линейном ускорителе на второй кратности. В результате на выходе из линейного ускорителя их полная энергия составляет 10 МэВ / 5 МэВ/нукл., а скорость равна половине скорости протонов. Несмотря на это, начальное поле и время инжекции остаются такими же, как и для протонов.

Для уменьшения разброса по импульсам и модуляции энергии дейтронов в настоящее время используется тот же резонатор, что и для протонов. Однако величина базы дрейфа $l_D = 9$ м в этом случае оказывается не оптимальной.

Как видно из рис. 4, оптимальное выравнивание энергии на этой базе происходит при напряжении на щели 100 кВ. Импульсный разброс $\Delta p/p$ уменьшается с $\pm 0,4\%$ до $\pm 0,1\%$. Однако при изменении фазы от -60° до $+60^\circ$ глубина модуляции энергии m составляет всего

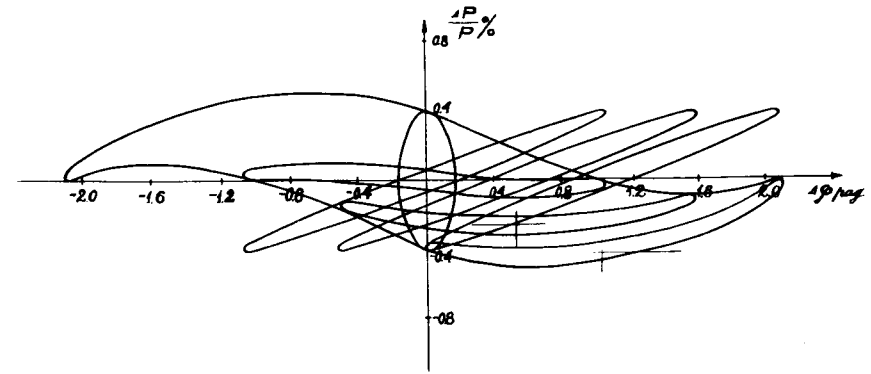


Рис. 4. Процесс одновременного выравнивания и модуляции энергии дейтронного пучка. Начальный разброс импульсов $\Delta p/p = \pm 0,4\%$, амплитуда напряжения на щели выравнителя 100 кВ, фаза изменяется от -60° до $+60^\circ$.

1%. Увеличение напряжения на щели до 300 кВ обеспечило бы необходимую глубину модуляции $m = 3\%$ /при изменении фазы от -60° до $+60^\circ$ /, однако вместо сужения энергетического разброса произошло бы его увеличение.

Расчет показывает, что оптимальная база дрейфа при ускорении дейтронов и ядер легких элементов составляет $l_D = 4 \div 4,5$ м. В этом случае достигаются сужение импульсного разброса $\Delta p/p$ с $\pm 0,4\%$ до $\pm 0,15\%$ и необходимая глубина модуляции $m = 3\%$ /при изменении фазы напряжения на щели резонатора от -60° до $+60^\circ$./

Дальнейшее увеличение эффективности инжекции протонов и ядер легких элементов возможно при использовании системы, состоящей из трех резонаторов. Первый резонатор, расположенный непосредственно на выходе инжектора, должен осуществлять модуляцию энергии путем изменения фазы напряжения на его щели от -45° до $+45^\circ$. Второй резонатор, расположенный на расстоянии $l_D = 9$ м, будет сужать разброс по импульсам дейтронов и ядер легких элементов от $\pm 0,4\%$ до $\pm 0,1\%$. Третий резонатор, отстоящий от инжектора на $l_D = 15 \div 18$ м, будет сужать разброс по импульсам протонов с $\pm 0,4\%$ до $\pm 0,1\%$.

При использовании такой системы эффективность инжекции протонов возрастет на 30+50%, а дейтронов и ядер легких элементов - примерно в 2 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балдин А.М., Михайлов В.В., Рабинович М.С. ЖЭТФ, 1956, т.31, с.993.
2. Данилкин И.С., Рабинович М.С. ЖТФ, 1958, т.28, с.351.
3. Рубин Н.Б., Ярковой О.И. ОИЯИ, Р- 649, Дубна, 1961.
4. Есин С.К. и др. ОИЯИ, 555, Дубна, 1960.
5. Есин С.К. и др. ОИЯИ, 558, Дубна, 1960.
6. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, Р9-5956, Дубна, 1971.
7. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, Р9-9115, Дубна, 1975.
8. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, Р9-9120, Дубна, 1975.
9. Безногих Ю.Д. Автореферат диссертации. ОИЯИ, 9-6848, Дубна, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 декабря 1977 года.