

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

В 751

P9-88-416

С.Б.Ворожцов, М.Б.Калинкина, В.А.Саенко

**КОМПЛЕКС АППАРАТНЫХ
И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ
ДЛЯ АНАЛИЗА
ДИНАМИКИ ПУЧКА ЦИКЛОТРОНА**

1988

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением цикла работ, посвященных описанию разрабатываемого в ЛЯП ОИЯИ комплекса программ "ЦИКЛОТРОН" /1/, предназначенного для моделирования ускорителей циклотронного типа. В комплекс входят программы по расчету магнитной системы (MAGNET), ускоряющего ВЧ-поля (RF), динамики пучка (BEAM), а также программы управления режимами счета и представления данных в графической форме (PERCYS).

Структура и функционирование программного обеспечения автоматизированной системы PERCYS для задачи синтеза магнитной системы циклотрона (MAGNET) рассматривались в /1,2/. Данная работа посвящена описанию аппаратных и программных средств для расчета динамики пучка циклотрона.

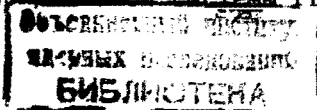
ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКСА

Схема программ представлена на рис.1. Основу блока BEAM составляют программы, представленные А.Шабером (ГАНИЛ) /3/, а также программы, подготовленные в ЛЯП ОИЯИ. Их функциональное назначение состоит в следующем:

- LONMOT - моделирование продольного движения частиц;
- ISO - определение среднего по азимуту изохронного поля при заданной вариации магнитного поля;
- SYCGA - определение частот обращения и свободных колебаний на замкнутых равновесных орбитах;
- LIBCYS - общая библиотека подпрограмм для ISO и SYCGA;
- ANJO - моделирование движения одной частицы в медианной плоскости;
- JOAN - расчет движения пучка в медианной плоскости с учетом пространственного заряда;
- NAJO - программа для исследования движения пучка в шестимерном фазовом объеме с учетом пространственного заряда;
- COMMUN - общая библиотека подпрограмм для всей системы BEAM.

Программы NAJO, JOAN, ANJO и COMMUN, предоставленные (ГАНИЛ), адаптированы на CDC-6500. Остальные программы подготовлены специально для блока BEAM.

Анализ результатов и подготовка исходных данных проводятся при помощи автоматизированной системы PERCYS, разработанной на



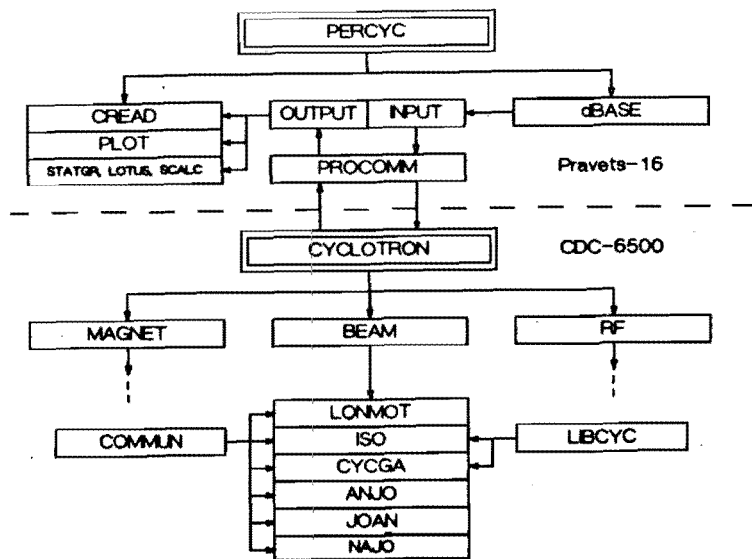


Рис.1. Схема программ для моделирования динамики пучка циклотрона.

базе ПЭВМ "Правец-16". ПЭВМ имеет следующие технические характеристики:

- память 512 Кбайт;
- твердый диск типа "WINCHESTER" 20 Мбайт;
- гибкий диск 360 Кбайт;
- матричная печать типа PRT-80GS, подключенная через параллельный порт к ПЭВМ;
- последовательный порт (скорость 4800 бод) для подключения к сети JINET;
- цветной дисплей типа CMM-1-RPSN;
- копроцессор INTEL-8087;

ПЭВМ "Правец-16" через локальную сеть JINET^{4/} подключена к ЭВМ CDC-6500.

Программное обеспечение PERCYC условно может быть разделено на две части:

- препроцессор - подготовка исходных данных для счета на CDC-6500;
- постпроцессор - обработка OUTPUT-файлов в формате ASCII.

Графическая система, которая используется как для препроцессора, так и для постпроцессора, содержит, помимо ранее описанных в^{2/} блоков, вновь созданную программу PLOT, а также

стандартный пакет STATGRAPHICS^{5/}. Программа PLOT, написанная на языке TURBO-PASCAL, позволяет одновременно обрабатывать несколько файлов, каждый из которых содержит информацию в виде таблиц. Интерпретация таблиц осуществляется в трех режимах:

- построение одного или нескольких графиков. В качестве аргумента или функции может быть использован любой из столбцов таблицы;
- построение одномерных гистограмм для любого из столбцов;
- режим "фазового пространства", где координаты (x,y) из двух любых столбцов изображаются в виде точек на графике.

Размеры стандартной таблицы ограничены значениями (20 x 1000), что определяется техническими характеристиками комплекса, приведенными выше. Работа с программой PLOT осуществляется при помощи многооконного меню, что значительно облегчает взаимодействие пользователя с ПЭВМ.

Стандартный пакет STATGRAPHICS используется для математической обработки данных и представления результатов в виде трехмерных графических объектов. Подготовка исходных данных /препроцессор/ проводится на основе управляемой базы данных DBASEIIIplus^{6/} с использованием возможностей графической системы. В базе данных содержится описание одного или нескольких объектов. Под объектом понимается совокупность параметров ускорительной установки, достаточно полная для проведения численного моделирования магнитной системы, динамики пучка, ВЧ-системы и т.д. Использование базы данных позволяет проводить преобразование параметров в форму INPUT-файлов для соответствующих расчетов на CDC-6500. При этом осуществляются контроль и необходимая модификация информации.

Обмен INPUT- и OUTPUT-файлами между ПЭВМ и CDC-6500 производится с помощью программы PROCOMM^{7/}.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА

Разработанный комплекс был использован для расчета динамики пучка дейтронного радиально-секторного циклотрона ДЦ-1^{8/}. Моделирование проводилось в несколько этапов. На первом этапе выполнялся расчет характеристик замкнутых орбит /статический случай/. На втором - расчет центральной траектории пучка с учетом набора энергии, и на третьем - определение характеристик пучка в целом от инжекции до конечных радиусов.

Исходные данные для расчетов по параметрам пучка, ВЧ-системы, магнитной системы ДЦ-1 приведены в таблице. При этом использовались работы^{8,9/} и последующие уточнения. Магнитное поле^{10/} задавалось в виде карты в полярной системе координат с шагом 3 см по радиусу и 0,5 град. по азимуту.

Таблица
 Параметры ДЦ-1, используемые для моделирования. d1, d2 :
 дельта-электроды; FT : flat-top - резонатор

Параметры	Проектные значения	Введены в данной работе
Ускоряемая частица	D_2^{+1}	
Частота обращения частиц (МГц)	12,375	
Энергия инжекции (МэВ/нуклон)	7,5	
Конечная энергия (МэВ/нуклон)	45-50	
Радиус инжекции (м) ("долина" между магнитами)		0,42315
Радиальный эмиттанс (пи·мм·мрад)	5 мм · 6 мрад = 30	
Продольный эмиттанс (пи·град·промилле)	13 град · 5 промилле = 65	
Вертикальный эмиттанс (пи·мм·мрад)	5 мм · 4,8 мрад = 24	
Гармоника ВЧ - d1, d2 FT	6 -	- 12
Частота (МГц) - d1, d2 FT	74,25 -	- 148,5
Напряжение (кВ)- d1, d2 FT	300 -	410 210
Фаза (град.)- d1, d2 FT		0 92,2
Азимутальное положение резонаторов (град.)	d1 - d2 - FT -	90 270 180
Угловое расстояние между серединами ускоряющих зазоров резонатора (град.)	d1, d2 20 FT -	- 10
Высота ускоряющего зазора (см)	d1, d2 4 FT -	- 2
Угловой размер ускоряю- щего зазора (град.)	d1, d2 4 FT -	- 2

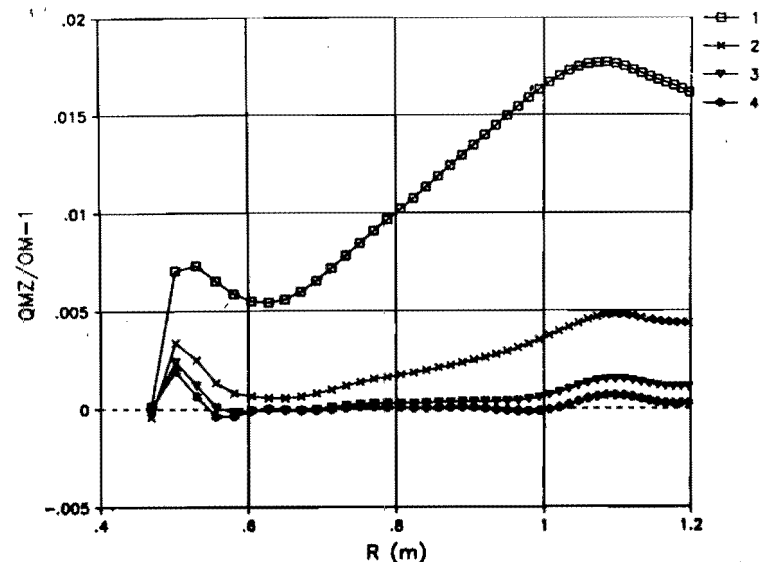


Рис.2. Процесс получения изохронного поля.

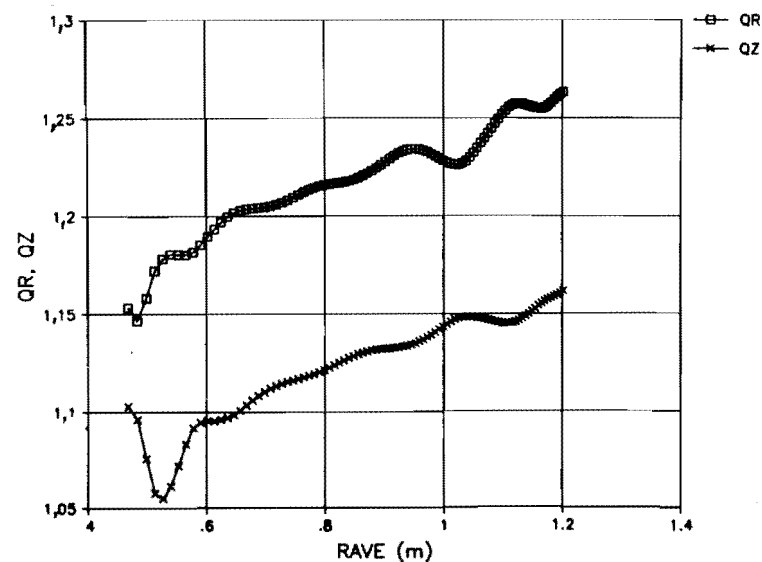


Рис.3. Частоты свободных колебаний.

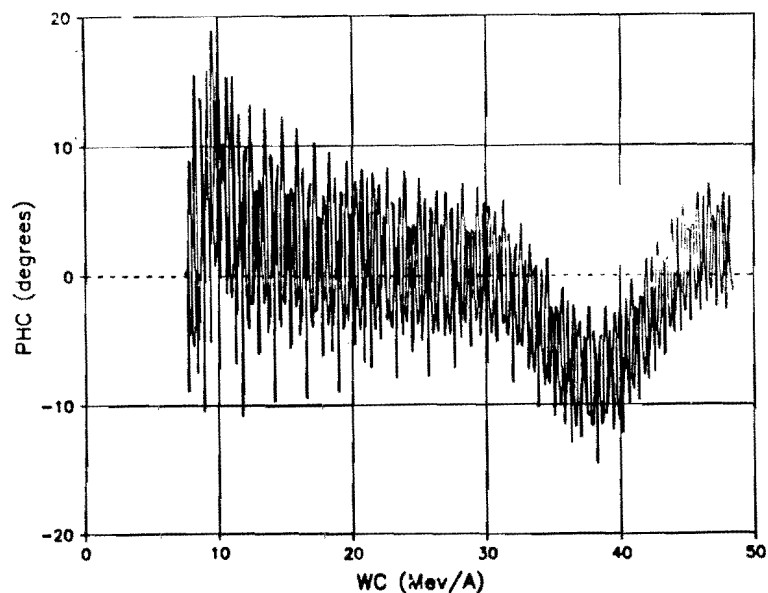


Рис.4. Зависимость фазы /град./ центральной частицы от энергии (МэВ/нуклон) по отношению к ускоряющему полю.

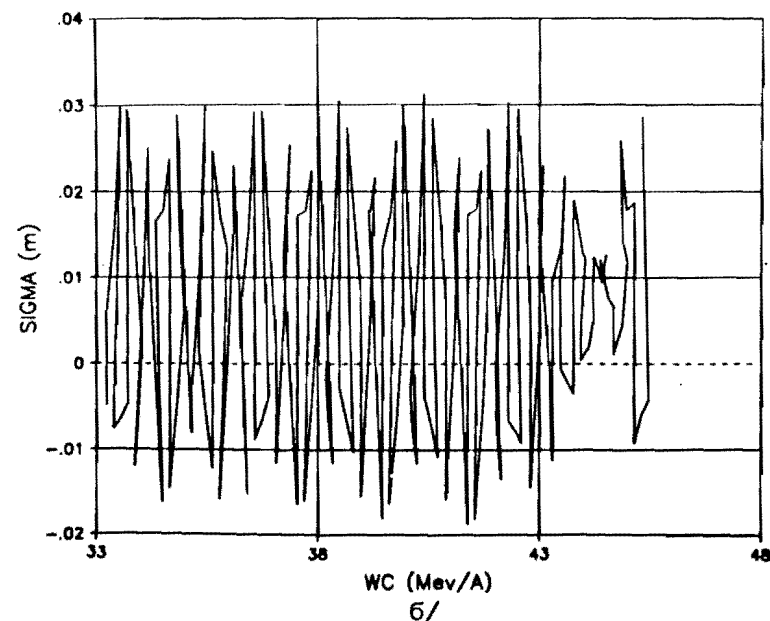
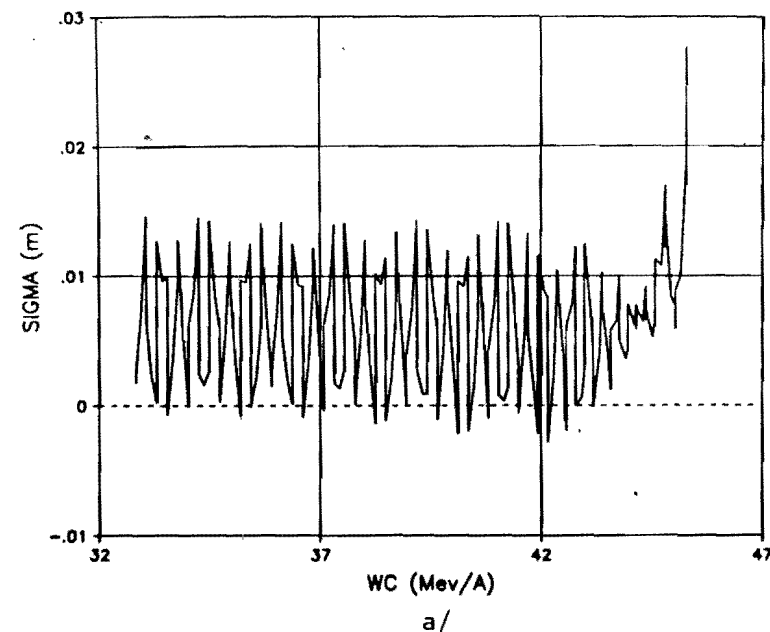


Рис.5. Расстояние (м) между соседними орбитами в зависимости от энергии (МэВ/нуклон) а/ без FT-резонатора, б/ с FT-резонатором.

Уточнение среднего по азимуту поля и приведение его к изохронному при заданном флаттере выполнялось при помощи программы ISO. Из рис.2 видно, что за 4 итерации удается получить постоянную частоту обращения на замкнутых равновесных орбитах.

Для полученного поля на рис.3 приведены динамические характеристики орбит. Поведение фазы центра пучка показано на рис.4.

Из рис.5 видно, что амплитуда когерентных радиальных колебаний пучка при наличии FT-резонатора достигает 1,5 см. Это обстоятельство позволяет высказать предположение о возможности вывода пучка из ускорителя без искажения радиального эмиттанта, используя разделение соседних орбит, возникающее за счет когерентных радиальных колебаний пучка при наличии FT-резонатора^{/11/}.

На рис.6 показано действие "продольного" пространственного заряда на энергетический разброс в пучке. Основной эффект "продольного" пространственного заряда проявляется в диапазоне 7,5-20 МэВ/нуклон^{/12/}, в дальнейшем наблюдается некоторое уменьшение энергетического разброса в пучке^{/13/}.

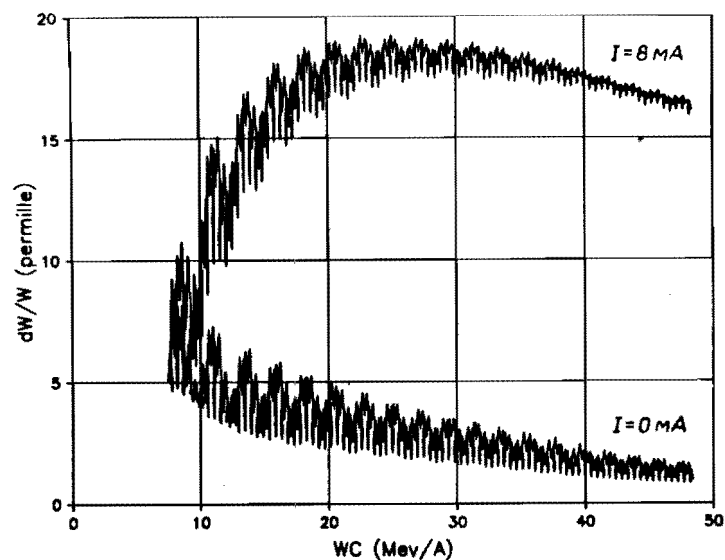


Рис.6. Зависимость энергетического разброса в пучке (промилле) в процессе ускорения от начальной до конечной энергии (МэВ/нуклон) для $I=0$ мА и $I=8$ мА.

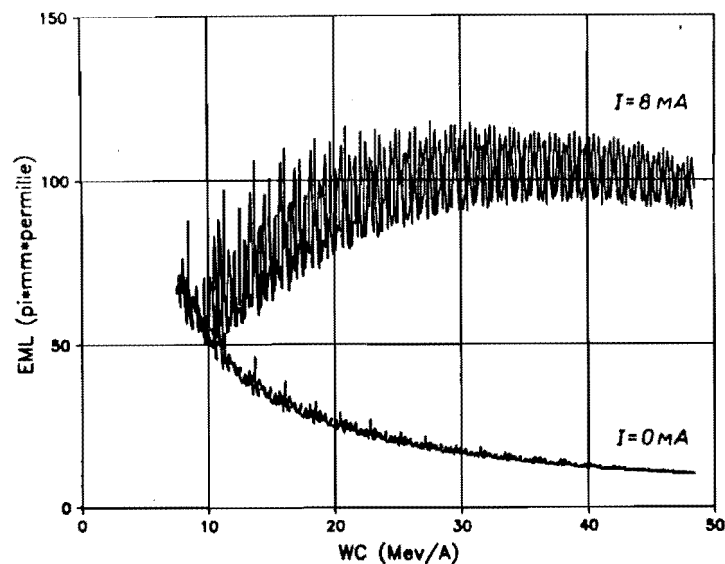


Рис.7. Продольный эмиттанс пучка (пи·мм·промилле) в зависимости от энергии (МэВ/нуклон) для $I=0$ мА и $I=8$ мА.

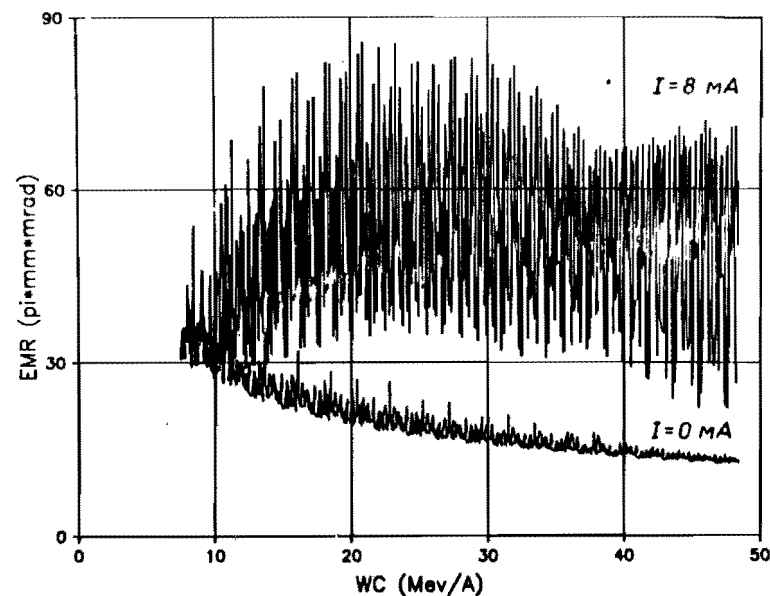


Рис.8. Эффективный радиальный эмиттанс пучка (пи·мм·рад) в зависимости от энергии (МэВ/нуклон) для $I=0$ мА и $I=8$ мА.

На рис.7 и 8 отмечено влияние пространственного заряда на продольный эмиттанс и на эффективный радиальный эмиттанс (объединение эмиттансов для всех энергий в пучке).

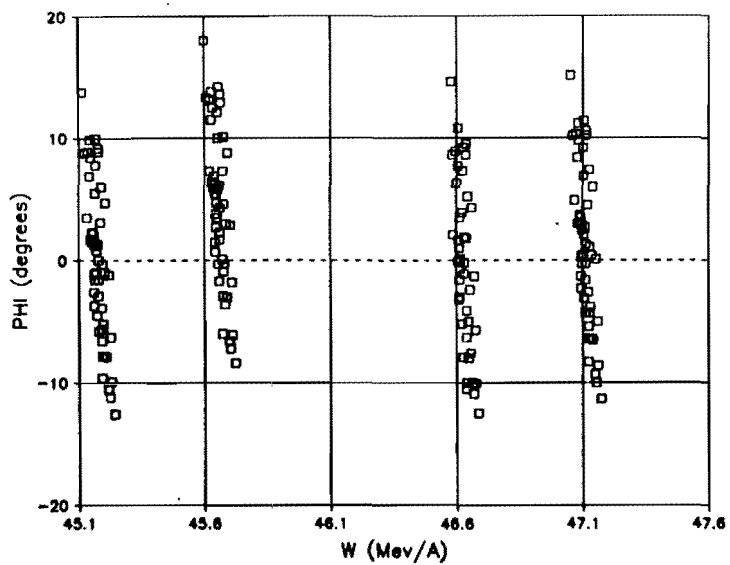
На рис.9а даны положения орбит на фазовой плоскости продольного движения.

Поскольку регистрация частиц проводилась с помощью "прозрачного" пробника, установленного на определенном радиусе, оказалась пропущенной одна из орбит с энергией примерно 46,2 МэВ/нуклон. На рис.9б видны характерные "завихрения" под воздействием пространственного заряда [12,13].

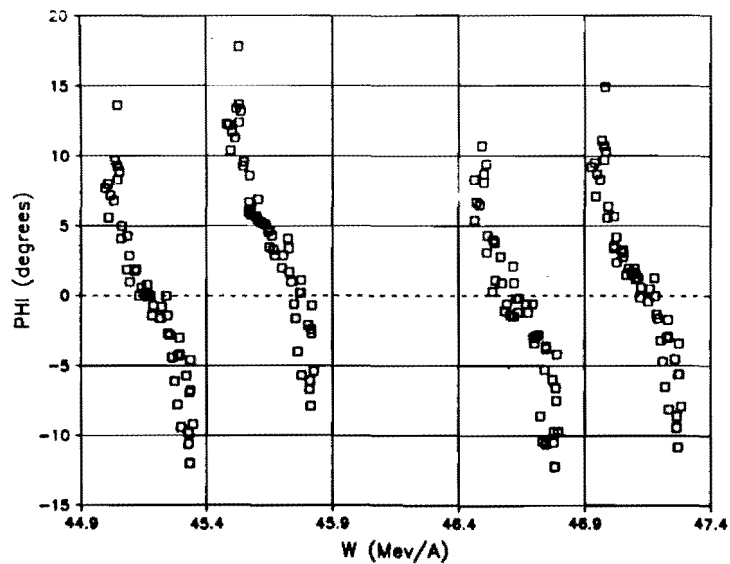
Как видно из рис.10, по мере увеличения интенсивности пучка начинается перемешивание по энергии и в пространстве соседних орбит.

Таким образом, созданный комплекс позволяет оперативно и с высокой эффективностью проводить анализ динамики пучка циклотрона.

В результате проведенного моделирования для ДЦ-1 получена информация о поведении заряженных частиц с учетом пространственного заряда пучка.

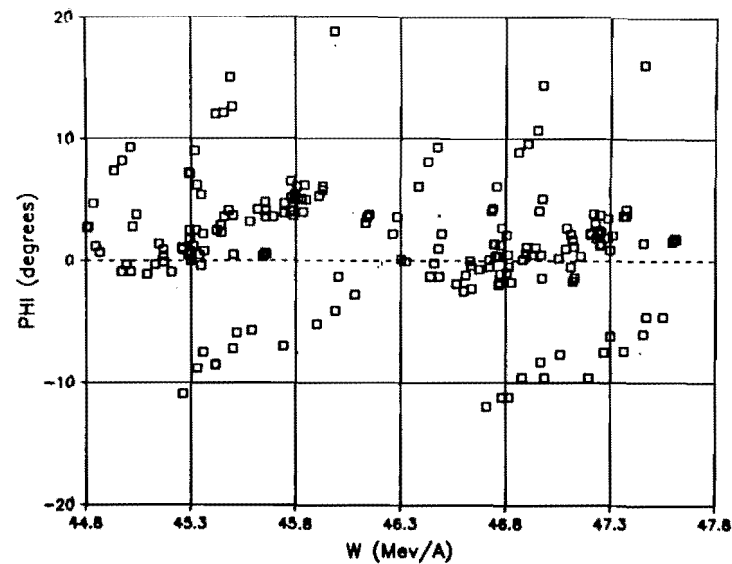


a/

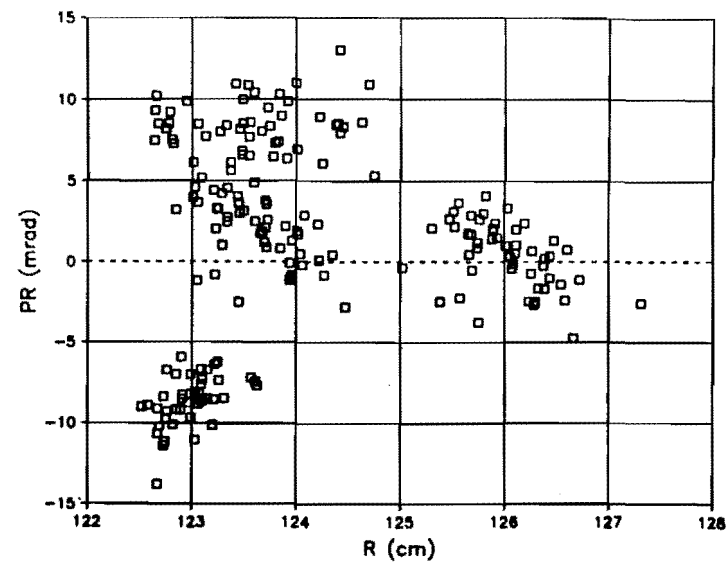


б/

Рис.9. Положение орбит вблизи конечной энергии на фазовой плоскости (ϕ (град.), W (МэВ/нуклон))
а/ $I=0$ мА, б/ $I=1,6$ мА.



a/



б/

Рис.10. Положение орбит на фазовой плоскости:
а/ продольного движения для $I=8$ мА; б/ поперечного движения $I=8$ мА.

Авторы благодарны профессору В.П.Дмитриевскому за постоянное внимание к работе, плодотворное обсуждение и неизменную поддержку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vorozhtsov S.B., Kalinkina M.B., Saenko V.A. In: Proc. of the Conf. on Computation of Electr. Fields, Graz, Austria, 1987; ОИЯИ Р9-87-457, Дубна, 1987.
2. Ворожцов С.Б., Калинкина М.Б., Саенко В.А. ОИЯИ Р7-87-671, Дубна, 1987.
3. Chabert A., Prome M. In: Proc. of the Conf. on Accel. Design and Oper., Berlin, 1983, Springer-Verlag, 1984, p.164.
4. Говорун Н.Н. и др. ОИЯИ, Д11-86-702, Дубна, 1986.
5. STATGRAPHICS, User's Guide, v.2.1, Statistical Graphics Corporation, 1986.
6. Tsu-der Chou, George, dBASE III+ : la pratique Paris : Inter Editors, 1987.
7. PROCMM, Program Reference Manual, v.2.3, PIL Software Systems, 1986.
8. Глазов А.А. и др. В кн.: Труды Всес. сов. по ускорителям ионов низких и средних энергий, Киев, Наукова думка, 1982, с.182; ОИЯИ Р9-81-734, Дубна, 1981.
9. Борисов О.Н. и др. В кн.: Труды десятого всес. сов. по ускорителям заряж. частиц. Дубна, 1986, т.11, с.233.
10. Vorozhtsov S.B. et al. - J. de Physique, 1984, C1, N1, v.45, p.C1-893; JINR E9-83-608, Dubna, 1983.
11. Yamazaki T. et al. In: Proc. of the 6th Symposium on Acc. Scien. and Tech., 1987, Tokyo, Japan, Ionics, p.274.
12. Joho W. In: Proc. of 11 Int. Conf. on Cycl. Appl., Tokyo, 1986.
13. Baron E. et al. In: Proc. of 11 Int. Conf. on Cycl. Appl., Tokyo, 1986; GANIL, A.86.06.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 июня 1988 года.

Ворожцов С.Б., Калинкина М.Б., Саенко В.А.
Комплекс аппаратных и программных средств
для анализа динамики пучка циклотрона

Р9-88-416

В основу созданного комплекса для анализа динамики пучка циклотрона положена система программ /ГАНИЛ/ ³, а также других программ, подготовленных в ЛЯП ОИЯИ. Комплекс построен на базе ПЭВМ "Правец-16", подключенной через локальную сеть JINET к CDC-6500. Управление счетом и обработка результатов осуществляются с ПЭВМ при помощи базы данных. Применение созданной системы позволяет оперативно выполнять расчет замкнутых орбит, частот свободных колебаний, численное определение изохронного поля при заданном флаттере, расчет центральной траектории пучка, моделировать проводку пучка от начальных до конечных радиусов с учетом и без учета эффекта пространственного заряда.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С.Виноградовой

Vorozhtsov S.B., Kalinkina M.B., Saenko V.A.
Hardware and Software Complex for Cyclotron Beam
Dynamics Simulation

Р9-88-416

The main part of the considered complex for cyclotron beam dynamics simulation is the system of programs provided by courtesy of A.Chabert /GANIL/³, and also the programs written at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR. For the beam dynamics simulation the "Pravets-16" personal computer connected to CDC-6500 host computer through JINET local net is used. Implementation of this system allowed one to carry out the calculations of equilibrium orbit, betatron frequencies, isochronous field under the given flutter, central beam orbit, the beam transition from injection to extraction radii with space charge effects included.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988