

P9-2003-109

И. Н. Киян, С. Б. Ворожцов, Р. Тарашкевич*

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ
РАСЧЕТА ЗАМКНУТЫХ РАВНОВЕСНЫХ ОРБИТ
ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА (EQUILIBRIUM
ORBIT RESEARCH PROGRAM — **EORP**)

*Институт ядерной физики, Краков, Польша

Введение

В изохронных циклотронах с вариацией магнитного поля ускоряемая частица в процессе ускорения движется по сложной траектории, которую можно с достаточно хорошей точностью описать на основе анализа замкнутых равновесных орбит. Замкнутая равновесная орбита описывается через $r_{\text{co}}(\theta)$ - радиус и $\varphi_p(\theta)$ - угол импульса частицы.

Представленная в данной работе программа для расчёта замкнутых равновесных орбит изохронного циклотрона (Equilibrium Orbit Research Program - EORP) представляет собой один из расчётных модулей программы помощи оператору в выборе режимов работы изохронного циклотрона (Cyclotron Operator Help Program - COHP*). Данная программа написана на C++ с использованием Visual C++ v.6.0 для Windows 32. Целями написания EORP были: во-первых, использование данной программы для расчётов в качестве отдельного модуля с дружественным графическим интерфейсом пользователя ввиду отсутствия других программ с аналогичным набором возможностей, во-вторых, встраивание программного кода в программу помощи оператору.

В программу помощи оператору входят ещё несколько расчётных модулей: программа расчёта среднего магнитного поля изохронного циклотрона с учётом флаттера (Cyclotron Analytic Model Program – CAMP [1]), программа для расчёта частот свободных колебаний - $f_r(r)$ и $f_z(r)$ (Betatron Oscillation Research Program – BORP [2]). Кроме этих модулей, расчётная часть COHP включает в себя описание алгоритма подбора токов в катушках изохронного циклотрона на основе метода Ньютона*. Программа помощи оператору также включает в себя две SQL реляционные базы данных параметров контроля и управления работой изохронного циклотрона*.

Роль расчётного модуля EORP внутри COHP заключается в уточнении кинетической энергии вывода на заданном среднем радиусе вывода частицы внутри итерационного цикла, включающего в себя расчёт по приближённым формулам частоты обращения частицы, среднего магнитного поля и энергетического радиуса вывода, соответствующего среднему радиусу вывода частицы.

Описание программных модулей, находящихся в стадии разработки, будет дано в последующих публикациях по завершении работы над ними.

Описание алгоритма программы

Данный программный алгоритм разработан на основе теории ускорителей с пространственной вариацией постоянного магнитного поля, описанной в [3], на основе аналитической теории фазовых процессов в изохронных циклотронах, описанной в [4], на основе аналитической теории динамики частиц, описанной в [5], а также на основе оригинальных аналитических выкладок. Программный алгоритм представлен в виде блок-схемы на рис. 1.

* Находится в стадии разработки.

1. Считывание исходных данных из выходного CAMP файла: *.flt.

2. Гармонический анализ считанной карты поля для расчёта коэффициентов Фурье: $G_N(\bar{r})$, $H_N(\bar{r})$ и

$$B_N(\bar{r}) = \sqrt{G_N^2(\bar{r}) + H_N^2(\bar{r})}; \quad \varphi_N(\bar{r}) = \frac{1}{N} \cdot \text{arctg} \left(\frac{G_N(\bar{r})}{H_N(\bar{r})} \right);$$

где \bar{r} - средний радиус замкнутой равновесной орбиты, а N - периодичность магнитной структуры.

3. Расчёт индекса поля:

$$k(\bar{r}) = \bar{r} \cdot \frac{\left(\frac{dB(\bar{r})}{d\bar{r}} \right)}{B(\bar{r})}; \quad \text{где } \bar{B}(\bar{r}) - \text{среднее магнитное поле, усреднённое по азимуту для каждого среднего радиуса.}$$

4. Расчёт нормированной средним полем амплитуды основной гармоники и её производной по среднему радиусу:

$$\varepsilon_N(\bar{r}) = \frac{B_N(\bar{r})}{B(\bar{r})}; \quad \varepsilon'_N(\bar{r}) = \frac{d\varepsilon_N(\bar{r})}{d\bar{r}};$$

5. Расчёт энергетического радиуса замкнутой равновесной орбиты:

$$r_{\text{en}} = \bar{r} + \Delta r; \quad \text{где}$$

$$\Delta r = \bar{r} \cdot \frac{\varepsilon_N^2(\bar{r})}{2 \cdot [N^2 - k(\bar{r}) - 1]} \cdot \left(2 \cdot \frac{N^2}{2 \cdot [N^2 - k(\bar{r}) - 1]} + k(\bar{r}) + \bar{r} \cdot \frac{\varepsilon'_N(\bar{r})}{\varepsilon_N(\bar{r})} \right);$$

6. Расчёт относительной скорости обращения частицы на замкнутой равновесной орбите:

$$\beta(r_{en}) = \frac{\overline{B(r)} \cdot r_{en} \cdot |q| \cdot c}{\sqrt{(\overline{B(r)} \cdot r_{en} \cdot |q| \cdot c)^2 + E_0^2}}; \quad \text{где} \quad E_0 = m_0 \cdot c^2;$$

q - заряд ускоряемой частицы, а c – скорость света.

7. Расчёт коэффициента удлинения орбит:

$$\delta(\bar{r}) = 0.25 \cdot \frac{\varepsilon_N^2(\bar{r}) \cdot N^2}{\lambda^2(\bar{r}) \cdot (N^2 - k(\bar{r}) - 1)^2}; \quad \text{где}$$

$$\lambda(\bar{r}) = 0.5 + \sqrt{0.25 + \frac{\varepsilon_N^2(\bar{r})}{2 \cdot [N^2 - k(\bar{r}) - 1]} \cdot \left(\frac{3 \cdot N^2}{2 \cdot [N^2 - k(\bar{r}) - 1]} + k(\bar{r}) + \bar{r} \cdot \frac{\varepsilon_N'(\bar{r})}{\varepsilon_N(\bar{r})} \right)};$$

8. Расчёт частоты обращения частицы на замкнутой равновесной орбите:

$$F_{rot}(\bar{r}) = \frac{\beta(r_{en}) \cdot c}{2\pi \cdot \bar{r} \cdot (1 + \delta(\bar{r}))};$$

9. Расчёт кинетической энергии частицы на замкнутой равновесной орбите:

$$E_k(r_{en}) = \sqrt{(\overline{B(r)} \cdot r_{en} \cdot |q| \cdot c)^2 + E_0^2} - E_0;$$

10. Расчёт радиуса замкнутой равновесной орбиты:

$$r_{\infty}(\theta) = \bar{r} \cdot \left\{ 1 + \frac{\varepsilon_N(\bar{r})}{\lambda(\bar{r}) \cdot [N^2 - k(\bar{r}) - 1]} \cdot \cos \left[N \cdot \left(\frac{\theta}{K_0} - \varphi_N(\bar{r}) \right) \right] \right\};$$

где θ (grad) - это азимут, $\varphi_N(\bar{r})$ (rad) - это фаза амплитуды основной гармоники относительно $\varphi_0 = 0$ (rad), и K_0 - это коэффициент перевода (grad/rad).

11. Расчёт угла отклонения импульса частицы от перпендикуляра к радиусу-вектору её движения на замкнутой равновесной орбите в зависимости от азимута:

$$\varphi_p(\theta) = \arcsin \left\{ \frac{N \cdot \varepsilon_N(\bar{r})}{\lambda(\bar{r}) \cdot (1 + \sigma(\bar{r})) \cdot [N^2 - k(\bar{r}) - 1]} \cdot \sin \left[N \cdot \left(\varphi_N(\bar{r}) - \frac{\theta}{K_0} \right) \right] \right\};$$

12. End.

Рис. 1. Блок-схема программного алгоритма

Описание интерфейса программы

Программа расчёта замкнутых равновесных орбит изохронного циклотрона, описываемых через $r_{\infty}(\theta)$ - радиус и $\varphi_p(\theta)$ - угол импульса частицы, позволяет представить рассчитанные данные в виде графиков и в виде таблицы результатов. Данные могут быть выведены на печать, а также записаны в виде файлов в бинарном и текстовом форматах.

Далее приведён пример работы программы для AVF – RIKEN изохронного циклотрона со спиральными секторами для полученного пучка ионов $^{14}\text{N}^{5+}$, с конечной энергией 7 МэВ/нукл. Ввод исходных данных осуществляется через считывание выходного САМР файла: *.flt. Таблица результатов расчёта приведена ниже. В ней представлены значения среднего радиуса, энергетического радиуса, частоты обращения и кинетической энергии частицы, а также значения радиуса замкнутой равновесной орбиты и значения угла отклонения импульса частицы от перпендикуляра к радиусу-вектору её движения на замкнутой равновесной орбите для двадцати значений азимута.

Таблица результатов расчёта для изохронного циклотрона со спиральными секторами и величиной функции флаттера в пределах $0 \div 7 \cdot 10^{-2}$ приведена на рис.2.

Number	R mean (m)	R enery (m)	F rot. (Hz)	W kin. (eV)
1	+040000	+040000	+8242013.695020	+311444.045213
2	+060000	+060002	+8224187.480071	+697757.819504
3	+080000	+080017	+8203928.173789	+1234485.346263
4	+100000	+100059	+8191658.053986	+1923493.442702
5	+120000	+120137	+8182653.799706	+2764562.312798
6	+140000	+140249	+8173383.267002	+3755737.553545
7	+160000	+160391	+8164120.142406	+4896440.253665
8	+180000	+180555	+8156254.834710	+6188010.189586
9	+200000	+200738	+8150659.575860	+7632779.257133
10	+220000	+220936	+8146560.462264	+9231013.199866
11	+240000	+241141	+8146206.216006	+10990329.858404
12	+260000	+261345	+8144208.186029	+12898584.665101
13	+280000	+281555	+8142983.602268	+14962373.052699
14	+300000	+301766	+8143327.854684	+17186305.844326
15	+320000	+321976	+8145215.241858	+19573089.502361
16	+340000	+342176	+8147398.675388	+22119065.742051
17	+360000	+362359	+8148129.785286	+24814537.800366
18	+380000	+382526	+8147088.053006	+27854702.335112
19	+400000	+402681	+8145743.859981	+30647005.683475
20	+420000	+422825	+8144871.492047	+33797302.558965
21	+440000	+442953	+8144560.677198	+37107615.658605
22	+460000	+463064	+8144154.142884	+40572965.708299
23	+480000	+483158	+8144040.395791	+44197572.736047
24	+500000	+503230	+8144399.663482	+47984583.440663
25	+520000	+523272	+8145056.922603	+51933313.032655
26	+540000	+543276	+8145273.303970	+56034709.779322
27	+560000	+563231	+8144999.518366	+60286873.436788
28	+580000	+583120	+8144017.384026	+64684809.388639

Рис. 2. Таблица результатов расчёта (AVF – Riken, пучок ионов $^{14}\text{N}^{5+}$ с конечной энергией 7 МэВ/нукл.)

Оценка точности расчётов EORP проводилась на основе расчётов, сделанных с помощью программы CYCLOPS, использующей численные методы. Оценка проводилась по формуле $\varepsilon = \frac{F_{\text{EORP}} - F_{\text{Cyclops}}}{F_{\text{Cyclops}}}$, где F_{EORP} и F_{Cyclops} - это частоты обращения частицы на замкнутой равновесной орбите, рассчитанные с помощью EORP и Cyclops соответственно. Результаты оценки приведены в таб. 1.

R_{mean} (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7
ε (unit)	$3e-5$	$3e-6$	$7e-5$	$7e-5$	$-1e-4$

Таб. 1. Результаты оценочного расчёта

Как видно из результатов оценочного расчёта, расхождение результатов EORP и Cyclops находится в пределах $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ во всём диапазоне рабочих радиусов для полученного пучка ионов. Относительная ошибка среднего изохронного магнитного поля, используемого в данных расчётах, составляет примерно $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ во всём диапазоне рабочих радиусов для полученного пучка ионов, что в 10 раз больше

относительной точности расчётов, сделанных с помощью EORP. Этот анализ доказывает пригодность EORP для использования в заданных целях.

На рис. 3 показан график частоты обращения частицы в зависимости от среднего радиуса на замкнутых равновесных орбитах.

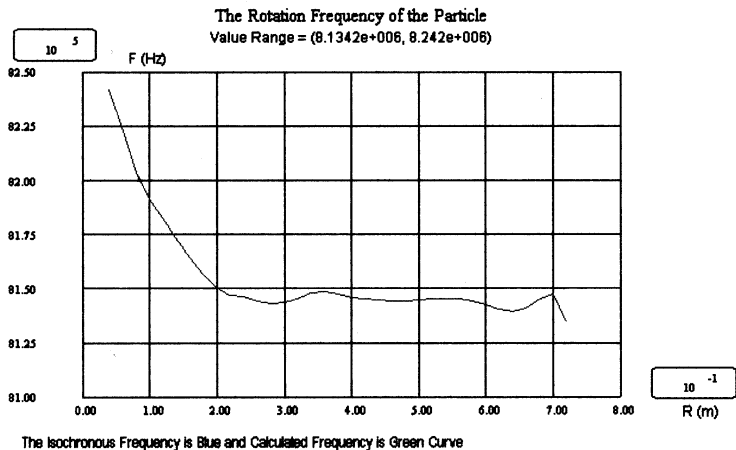


Рис. 3. Частота обращения частицы

На рис. 4 показан график кинетической энергии частицы в зависимости от энергетического радиуса на замкнутых равновесных орбитах.

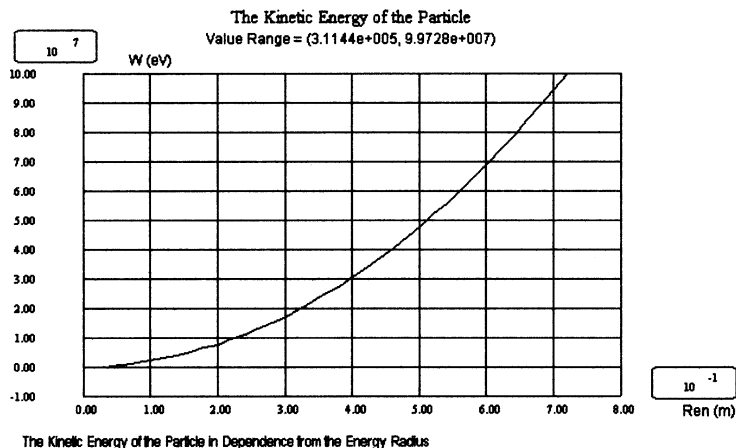


Рис. 4. Кинетическая энергия частицы

На рис. 5 показан график радиуса замкнутой равновесной орбиты в зависимости от азимута.

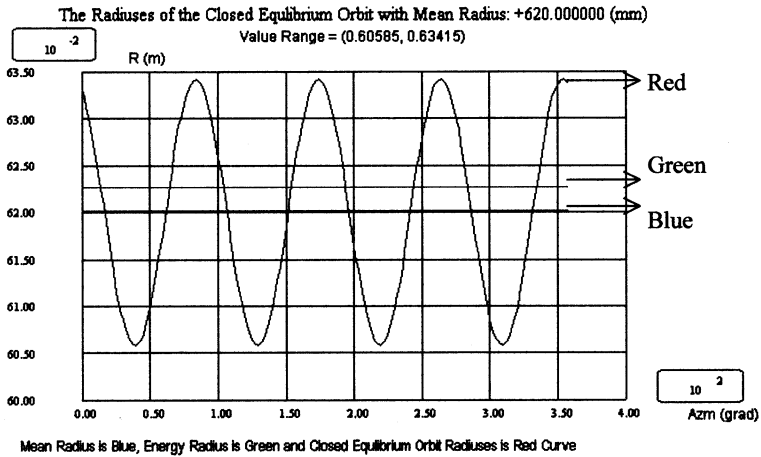


Рис. 5. Радиус замкнутой равновесной орбиты

На рис. 6 показан график угла отклонения импульса частицы от перпендикуляра к радиусу-вектору её движения на замкнутой равновесной орбите в зависимости от азимута.

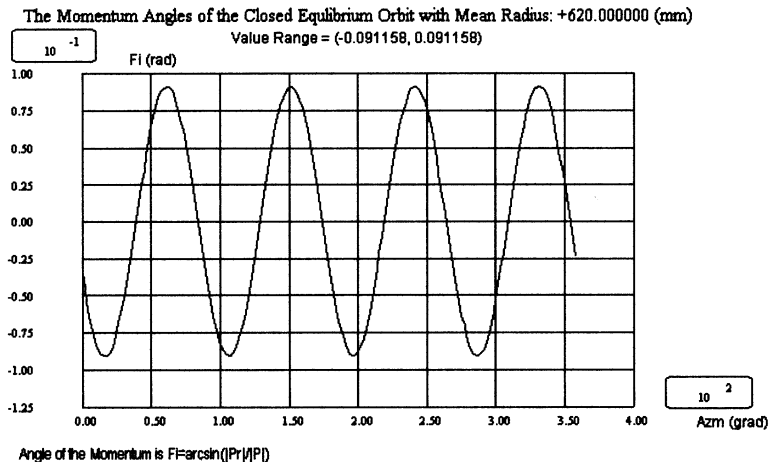


Рис. 6. Угол отклонения импульса частицы от перпендикуляра к радиусу-вектору её движения на замкнутой равновесной орбите

Применение программы для различных циклотронных установок

В процессе настройки программы были выполнены расчёты для различных циклотронных установок: циклотрон со спиральными секторами AVF – RIKEN для полученного пучка ионов $^{14}\text{N}^{5+}$ с конечной энергией 7 МэВ/нукл, циклотрон с прямыми секторами SSC2 – CAEN для полученного пучка ионов $^{36}\text{Ar}^{18+}$ с конечной энергией 95.5 МэВ/нукл, циклотрон со спиральными секторами AIC144 – KRAKOW для полученного пучка протонов с конечной энергией 60 МэВ/нукл. Результаты расчётов показаны на рис. 2, рис. 7 и рис. 8 соответственно.

Таблица результатов расчёта для изохронного циклотрона с прямыми секторами и величиной функции флаттера в пределах $0.7058 \div 0.7052$ дана на рис. 7.

The Results of the Analysis of the Closed Equilibrium Orbits

Save as... Exit

Number	R mean (m)	R enery (m)	F rot. (Hz)	W kin. (eV)
1	+1.000000	+1.056492	+6725661.861260	+350226438.94026
2	+1.020000	+1.077653	+6725652.394924	+364606780.35050
3	+1.040000	+1.098815	+6725642.553711	+379290701.23660
4	+1.060000	+1.119979	+6725632.505680	+394279370.45270
5	+1.080000	+1.141146	+6725622.249884	+409573965.02100
6	+1.100000	+1.162314	+6725611.785352	+425175688.80580
7	+1.120000	+1.183484	+6725601.111094	+441085772.78420
8	+1.140000	+1.204656	+6725590.226093	+457305475.32371
9	+1.160000	+1.225831	+6725579.129314	+473836082.46627
10	+1.180000	+1.247007	+6725567.819694	+490678908.22100
11	+1.200000	+1.268186	+6725556.296150	+507835294.86340
12	+1.220000	+1.289367	+6725544.557576	+525306613.24230
13	+1.240000	+1.310551	+6725532.602838	+543094263.09460
14	+1.260000	+1.331736	+6725520.430782	+561199673.36790
15	+1.280000	+1.352925	+6725508.040228	+579624302.55120
16	+1.300000	+1.374115	+6725495.429970	+598369639.01370
17	+1.320000	+1.395308	+6725482.598778	+617437201.35180
18	+1.340000	+1.416504	+6725469.545397	+636828538.74450
19	+1.360000	+1.437702	+6725456.268545	+656545231.31840
20	+1.380000	+1.458903	+6725442.766915	+676588890.52000
21	+1.400000	+1.480106	+6725429.039173	+696961159.49830
22	+1.420000	+1.501312	+6725415.083958	+717663713.49590
23	+1.440000	+1.522521	+6725400.899882	+738698260.25000
24	+1.460000	+1.543733	+6725386.485528	+760066540.40230
25	+1.480000	+1.564948	+6725371.839454	+781770327.91940
26	+1.500000	+1.586165	+6725356.960187	+803811430.52280
27	+1.520000	+1.607386	+6725341.846227	+826191690.12920
28	+1.540000	+1.628609	+6725326.496043	+8488912983.30117

Рис. 7. Таблица результатов расчёта (SSC2 – CAEN, пучок ионов $^{36}\text{Ar}^{18+}$ с конечной энергией 95.5 МэВ/нукл.)

Для данного изохронного циклотрона проводилась прямая оценка результатов расчётов, сделанных с помощью EORP. Оценка проводилась по формуле

$$\sigma = \frac{F_{\text{EORP}} - F_{\text{Is}}}{F_{\text{Is}}}, \text{ где } F_{\text{EORP}} - \text{ это частота обращения частицы на замкнутой равновесной орбите, рассчитанная с помощью EORP, а } F_{\text{Is}} - \text{ это изохронная частота обращения частицы для полученного пучка ионов.}$$

Результаты оценки приведены в таб. 2.

R_{mean} (m)	1.2	1.6	2.0	2.4	2.9
σ (unit)	8e-5	4e-5	-1e-5	-9e-5	-2e-4

Таб. 2. Результаты оценочного расчёта

Как видно из результатов оценочного расчёта, относительная ошибка расчёта находится в пределах $+1 \cdot 10^{-4} \div -2 \cdot 10^{-4}$ во всём диапазоне рабочих радиусов для полученного пучка ионов. Оценка влияния высших гармоник на точность расчётов, проводимых с помощью EORP для изохронных циклотронов с большим значением флаттерной функции, является темой отдельного исследования.

Таблица результатов расчёта для изохронного циклотрона со спиральными секторами и величиной функции флаттера в пределах $0 \div 1.5 \cdot 10^{-2}$ дана на рис. 8.

Number	R mean (m)	R energy (m)	F rot. (Hz)	W kin. (eV)
1	+020000	+020000	+26327357.71940	+57139.292032
2	+040000	+040000	+26296479.67416	+227910.417282
3	+060000	+060003	+26276467.44998	+512646.481204
4	+080000	+080012	+26263610.24788	+911090.656205
5	+100000	+100033	+2625475.47545	+1420693.833215
6	+120000	+120064	+26187116.35085	+2042020.146119
7	+140000	+140103	+26176374.30885	+2780682.130211
8	+160000	+160143	+26182050.38968	+3638806.270448
9	+180000	+180182	+26179317.82278	+4611935.509778
10	+200000	+200222	+26166572.47078	+5698465.808425
11	+220000	+220266	+26158293.14372	+6904450.238233
12	+240000	+240314	+26155286.19174	+8232806.217324
13	+260000	+260363	+26153030.73646	+9683206.584398
14	+280000	+280412	+26151646.78451	+11257596.398829
15	+300000	+300460	+26149840.48490	+12956753.442603
16	+320000	+320506	+26148499.40750	+14783439.582245
17	+340000	+340552	+26149398.60101	+16742264.744560
18	+360000	+360594	+26148629.82408	+18830870.863160
19	+380000	+380619	+26147179.44574	+21052431.493197
20	+400000	+400615	+26147132.81776	+23412958.834628
21	+420000	+420571	+26151973.83652	+25923081.302662
22	+440000	+440512	+26144561.91205	+28549763.686014
23	+460000	+460491	+26141263.42209	+31329279.090130
24	+480000	+480538	+26155831.21018	+34306363.804743
25	+500000	+500617	+26168150.01301	+37438253.234725
26	+520000	+520647	+26160819.22837	+40670224.889012
27	+540000	+540525	+26140417.81052	+44012947.993857
28	+560000	+560174	+26136614.96965	+47573283.277384

Рис. 8. Таблица результатов расчёта (AIC144 – Krakow, пучок протонов с конечной энергией 60 МэВ/нукл.)

Для данного изохронного циклотрона проводилась прямая оценка результатов расчётов, сделанных с помощью EORP. Оценка проводилась по формуле

$\sigma = \frac{F_{\text{EORP}} - F_{\text{Is}}}{F_{\text{Is}}}$, где F_{EORP} - это частота обращения частицы на замкнутой равновесной орбите, рассчитанная с помощью EORP, а F_{Is} - это изохронная частота обращения частицы для полученного пучка ионов.

Результаты оценки приведены в таб. 3.

R_{mean} (m)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
σ (unit)	4e-4	-2e-4	-3e-4	5e-4	-5e-4

Таб. 3. Результаты оценочного расчёта

Как видно из результатов оценочного расчёта, относительная ошибка расчёта находится в пределах $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ во всём диапазоне рабочих радиусов для полученного пучка ионов. Большой разброс значений говорит о значительной величине относительной ошибки среднего изохронного магнитного поля, используемого в данных расчётах. Оценка влияния низших гармоник на точность расчётов, проводимых с помощью EORP для изохронных циклотронов с малым значением флаттерной функции, является темой отдельного исследования.

Заключение

Результаты расчётов, выполненных с помощью EORP, были проверены и подтверждены результатами расчётов, выполненных с помощью численных методов. Расхождение результатов, полученных с помощью EORP и с помощью численных методов для частоты обращения и кинетической энергии частицы, было в пределах $\pm 1 \cdot 10^{-4}$. Результаты расчётов $r_{\omega}(\theta)$ - радиуса и $\varphi_p(\theta)$ - угла импульса частицы, выполненных с помощью EORP и с помощью численных методов, практически совпали. Всё это говорит о правильности расчётов, сделанных с помощью EORP для различных изохронных циклотронов с азимутальной вариацией магнитного поля, а также доказывает пригодность программы для её использования в заданных целях.

Данная программа написана для Windows 32 на языке C++, который является в настоящее время самым быстродействующим языком программирования в мире. EORP написана в стандарте Single Document Interface (SDI) с использованием Visual C++ v.6.0, что позволило организовать удобный графический интерфейс взаимодействия с пользователем, включающий в себя стандартную Help-систему.

Данная программа может быть использована как для расчётов изохронных циклотронов с прямыми секторами, так и для расчётов изохронных циклотронов со спиральными секторами.

Авторы выражают свою глубокую признательность начальнику Циклотронного отдела д-ру Мареку Талаху и главному специалисту Циклотронного отдела д-ру Эдмунду Бакевичу из Института ядерной физики в Кракове за постоянное внимание к работе по созданию программного обеспечения для выбора эксплуатационных режимов работы изохронного циклотрона.

Выражаем также свою глубокую признательность всем, кто любезно предоставил в наше распоряжение карты изохронных магнитных полей различных изохронных циклотронов для полученных пучков ионов.

Литература

1. И.Н. Киян, С.Б. Ворожцов, Р. Тарашкевич: Сообщение ОИЯИ Р9-2002-170, Дубна, 2002.
2. И.Н. Киян, С.Б. Ворожцов, Р. Тарашкевич: Сообщение ОИЯИ Р9-2002-171, Дубна, 2002.
3. Дж. Ливингуд: “Принципы работы циклических ускорителей”, издательство иностранной литературы, Москва, 1963.
4. В.Н.Аносов, Ю.Н. Денисов, В.П. Дмитриевский, В.В. Кольга: Сообщение ОИЯИ 9-8496, Дубна, 1974.
5. В.П. Дмитриевский: “Мезонные фабрики”, стр. 168, труды I международной школы молодых учёных по проблемам ускорителей заряженных частиц Р9-9341, Дубна, 1976.

Получено 11 июня 2003 г.

Описание программы расчета замкнутых равновесных орбит
изохронного циклотрона (Equilibrium Orbit Research Program — EORP)

В данной работе описывается Equilibrium Orbit Research Program (EORP) — программа, написанная на C++ с использованием Visual C++. Данная программа предназначена для расчетов частоты обращения и кинетической энергии частицы на замкнутых равновесных орбитах изохронного циклотрона, описываемых через $r_{eo}(\theta)$ — радиус и $\varphi_p(\theta)$ — угол импульса частицы. Программный алгоритм разработан на основе статей, лекционных материалов и оригинальных аналитических выкладок. Результаты расчетов, выполненных с помощью EORP, были проверены и подтверждены результатами расчетов, выполненных численными методами. Расхождение результатов, полученных с помощью EORP и с помощью численных методов для частоты обращения и кинетической энергии частицы, было в пределах $\pm 1 \cdot 10^{-4}$. Результаты расчетов $r_{eo}(\theta)$ — радиуса и $\varphi_p(\theta)$ — угла импульса частицы, выполненных с помощью EORP и с помощью численных методов, практически совпали. Все это доказало правильность расчетов, сделанных с помощью EORP для различных циклотронов с азимутальной вариацией магнитного поля.

Как видно из результатов расчетов, данная программа может быть использована как для расчетов изохронных циклотронов с прямыми секторами, так и для расчетов изохронных циклотронов со спиральными секторами.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ и в Институте ядерной физики, Краков, Польша.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2003

Перевод авторов

Kian I. N., Vorojtsov S. B., Tarashkevich R.
Isochronous Cyclotron Closed Equilibrium Orbit
Calculation Program Description

P9-2003-109

The Equilibrium Orbit Research Program — EORP, written in C++ with the use of Visual C++ is described. The program is intended for the calculation of the particle rotation frequency and particle kinetic energy in the closed equilibrium orbits of an isochronous cyclotron, where the closed equilibrium orbits are described through the radius and particle momentum angle: $r_{eo}(\theta)$ and $\varphi_p(\theta)$. The program algorithm was developed on the basis of articles, lecture notes and original analytic calculations. The results of calculations by the EORP were checked and confirmed by using the results of calculations by the numerical methods. The discrepancies between the EORP results and the numerical method results for the calculations of the particle rotation frequency and particle kinetic energy are within the limits of $\pm 1 \cdot 10^{-4}$. The EORP results and the numerical method results for the calculations of $r_{eo}(\theta)$ and $\varphi_p(\theta)$ practically coincide. All this proves the accuracy of calculations by the EORP for the isochronous cyclotrons with the azimuthally varied fields.

As is evident from the results of calculations, the program can be used for the calculations of both straight — sector and spiral-sector isochronous cyclotrons.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR and at the Institute of Nuclear Physics, Krakow, Poland.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2003

Редактор *М. И. Зарубина*
Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 25.06.2003.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 0,68. Уч.-изд. л. 0,83. Тираж 270 экз. Заказ № 53982.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/