

## **АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СИНТЕЗА И ОПТИМИЗАЦИИ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР ЦИКЛОТРОНОВ**

*Й. Франко, Г. Г. Гульбекян, С. А. Костромин*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В работе рассматриваются аналитические зависимости, которые применяются для предварительного синтеза и определения основных физических и геометрических параметров магнитной структуры и самого магнита циклотрона. Также приводятся способ получения, описание и графическое представление этих двумерных аналитических зависимостей. Их использование позволяет предварительно синтезировать и оптимизировать магнитные структуры циклотронов с прямыми и спиральными секторами, близкие к азимутально-симметричным. Отношение их воздушных зазоров в долине и в районе секторов не должно превышать значения 25, угол спиральных секторов не должен быть больше  $40^\circ$  и среднее магнитное поле не более 2 Тл. Применение некоторых из этих зависимостей стало базовым в разработке программного приложения CyclSyntWin, которое в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (Дубна) уже несколько лет используется для предварительного синтеза и оптимизации основных параметров магнитных структур и магнитов циклотронов.

Analytical dependences which are applied to preliminary synthesis and determination of the main physical and geometrical parameters of magnetic structure and the magnet of a cyclotron are considered. Also the obtaining method, the description and graphic representation of these two-dimensional analytical dependences are considered. They allow one to pre-synthesize and optimize the magnetic structures of cyclotrons with straight and spiral sectors, close to the azimuthally symmetric ones. The ratio of the air gaps in the valley and in the sectors area should not exceed 25, the angle of the spiral sectors shall not be greater than  $40^\circ$ , and the average magnetic field is no more than 2 T. The application of some of these was the development of basic software application CyclSyntWin which has been used at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR, Dubna, for several years prior to preliminary synthesis and optimization of the main parameters of the magnetic structures and the magnets of cyclotrons.

PACS: 29.20.dg

### **ВВЕДЕНИЕ**

Для синтеза и оптимизации магнитных структур и магнитов циклотронов применяются как более простые и доступные программные приложения (Poisson [1]), так и 3D-приложения, разработанные коммерческими фирмами (ANSYS [2], Opera3D-Tosca [3], MerMaid [4], Kompot [5, 6] и т. д.).

Лаборатория ядерных реакций ОИЯИ (Дубна) является физическим центром, в котором было разработано и создано несколько циклотронов как для своей экспериментальной базы, так и для экспериментальных баз других стран (Словакии, Казахстана и т. д.).

На этапе выбора параметров циклотронов необходимо за относительно короткое время проанализировать несколько вариантов магнитных структур.

В этой работе рассматриваются аналитические зависимости, которые применяются для предварительного синтеза и определения основных физических и геометрических параметров магнитной структуры и самого магнита циклотрона.

Требования к точности такого предварительного синтеза и анализа невысокие, так как для окончательного моделирования выбранной структуры чаще всего используется одно из вышеупомянутых 3D-программных приложений.

Практика показала, что применение данных зависимостей с нижепоказанными пределами неточностей удовлетворяет этим требованиям.

Зависимости были получены в результате применения 3D-расчетов и обработки баз данных, реально работающих или проектируемых циклотронов с разной конструкцией их магнитных структур и с разными магнитными свойствами стали (сталь 3, сталь 10, сталь для ДС 72 с содержанием углерода от 0,01 до 0,07 %).

На пределы неточностей этих зависимостей в основном повлияло разнообразие конструктивного решения магнитных структур, входящих в базу данных, и ограничило их области применения.

Разброс магнитных свойств используемой стали для их конструирования меньше влияет на точность результатов применения этих аналитических зависимостей.

Аналитические зависимости позволяют предварительно синтезировать и оптимизировать магнитные структуры циклотронов с прямыми и спиральными секторами, близкие к азимутально-симметричным. Отношение их воздушных зазоров в долине и в районе секторов не должно превышать величину 25, угол спиральных секторов не должен быть больше  $40^\circ$  и среднее магнитное поле не больше 2 Тл.

Применение некоторых из них стало базовым в разработке программного приложения CyclSyntWin, которое в лаборатории уже несколько лет используется для предварительного синтеза и оптимизации основных параметров магнитных структур и магнитов циклотронов.

## 1. СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР ЦИКЛОТРОНОВ

Первые экспериментальные графические зависимости среднего магнитного поля  $\langle B \rangle$ , перепада уровней магнитного поля в районе секторов и в долине  $\Delta B_{\text{vall}}^{\text{hill}}$ , а также флаттера  $F$  магнитных структур модельных и действующих циклотронов были использованы для предварительного синтеза циклотрона U200В. Физико-техническое обоснование этого проекта разрабатывалось для Братиславы (Чехословакия) [7].

В последующие годы эта база данных расширялась. Были добавлены экспериментальные данные как с модельных (U225R, U200В), так и с реально действующих (U400, U400М) циклотронов. Для обработки этих данных, поиска аналитических функций раз-

работано программное приложение QuickFit [8] и получены двумерные аналитические зависимости характеристик магнитных структур в виде полиномов [9].

Позже были добавлены данные циклотрона DC 72 для Словакии [10, 11, 14, 15] и циклотронов DC 60 [12] и DC 350 для Казахстана [13], полученные 3D-расчетами этих структур. Данные были использованы для проверки и уточнения уже существующих двумерных аналитических зависимостей параметров магнитных структур.

Практическая работа с этими зависимостями вызвала необходимость расширения возможностей их применения вне существующих границ, отношения воздушных зазоров в долине и в районе секторов до 5.

Для расширения этих границ была создана и проанализирована 3D-программным приложением модель магнитной структуры (рис. 1) с более глубокой вариацией магнитного поля, с отношением воздушных зазоров в долине и в районе секторов до 25.

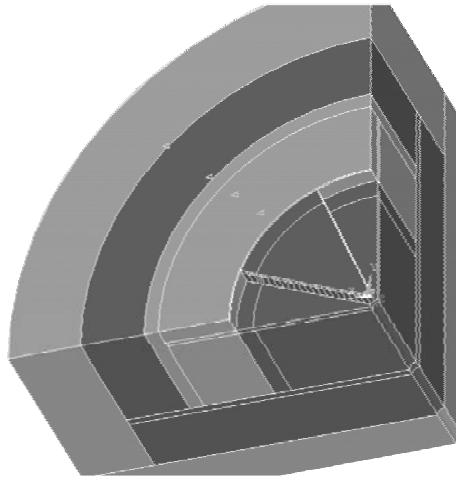


Рис. 1. Трехмерный вид расчетной модели магнитной структуры

Таким способом получены новые аналитические зависимости параметров магнитных структур, некоторые из них вошли в основу последней версии программного приложения CyclSyntWin.

## 2. ОПИСАНИЕ И ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДВУМЕРНЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР ЦИКЛОТРОНОВ

**2.1. Зависимость  $B = f(\text{AmTur}_{\text{hill}}, d_{\text{vall, hill}})$ ;  $0,6 < \text{AmTur}_{\text{hill}} < 25$ ,  $1,5 < d_{\text{vall, hill}} < 25$ .** Зависимость среднего магнитного поля  $B$  от величины ампер-витков на единицу воздушного зазора в районе секторов и отношения воздушных зазоров в долине и в холме  $d_{\text{vall, hill}}$  магнитной структуры определяется по формуле вида

$$B = (a_0 + a_1 \times \ln(\text{AmTur}_{\text{hill}}) + a_2 \times (\ln(\text{AmTur}_{\text{hill}}))^2 + a_3 \times d_{\text{vall, hill}} + a_4 \times d_{\text{vall, hill}}^2 + a_5 \times d_{\text{vall, hill}}^3) / (1 + a_6 \times \ln(\text{AmTur}_{\text{hill}}) + a_7 \times (\ln(\text{AmTur}_{\text{hill}}))^2 + a_8 \times (\ln(\text{AmTur}_{\text{hill}}))^3 + a_9 \times d_{\text{vall, hill}}).$$

Ниже представлены коэффициенты этой зависимости, и на рис. 2 отображено ее графическое представление.

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 1,0738666, & a_1 &= 0,5286792, & a_2 &= 0,044533871, & a_3 &= -0,066655629, \\
 a_4 &= 0,0058337835, & a_5 &= -0,00012529687, & a_6 &= -0,33771759, & a_7 &= 0,27363826, \\
 a_8 &= -0,045545475, & a_9 &= 0,028238817.
 \end{aligned}$$

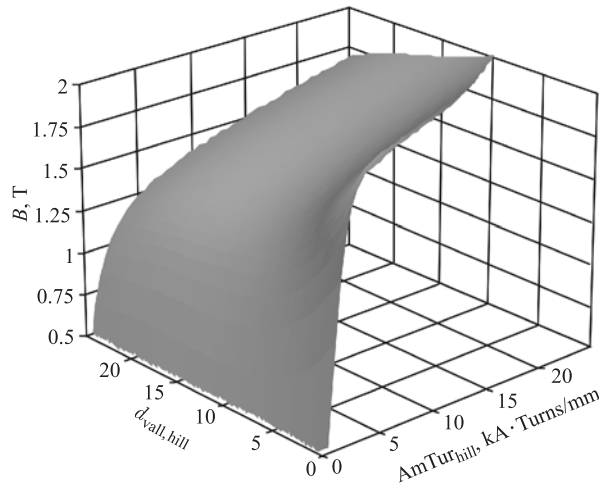


Рис. 2. Графическое представление двумерной зависимости среднего магнитного поля  $B$

В процессе сравнения данных среднего магнитного поля  $B$ , полученных по этой зависимости, с экспериментальными данными была определена неточность их вычисления в пределах  $+2 \div -3 \%$ .

**2.2. Зависимость**  $AmTur_{hill} = f(B, d_{val, hill})$ ;  $0,5 < B < 2,0$ ,  $1,5 < d_{val, hill} < 25$ . Зависимость ампер-витков на единицу воздушного зазора в районе секторов  $AmTur_{hill}$  от среднего магнитного поля  $B$  и отношения воздушных зазоров  $d_{val, hill}$  в долине и в районе секторов магнитной структуры определяется по формуле вида

$$\begin{aligned}
 AmTur_{hill} &= \frac{b_0 + b_1}{1 + ((B - b_2)/b_3)^2} + \frac{b_4}{1 + ((d_{val, hill} - b_5)/b_6)^2} + \\
 &+ \frac{b_7}{(1 + ((B - b_2)/b_3)^2) \times (1 + ((d_{val, hill} - b_5)/b_6)^2)}.
 \end{aligned}$$

Ниже представлены коэффициенты этой зависимости, и на рис. 3 отображено ее графическое представление.

$$\begin{aligned}
 b_0 &= 10,861889, & b_1 &= -289,23006, & b_2 &= 2,2198545, & b_3 &= 0,28540518, \\
 b_4 &= -22,510264, & b_5 &= 80,353384, & b_6 &= 72,891167, & b_7 &= 651,48818.
 \end{aligned}$$

В процессе сравнения данных ампер-витков на единицу воздушного зазора в районе секторов  $AmTur_{hill}$ , полученных по этой зависимости, с экспериментальными данными была определена неточность их вычисления в пределах  $+8 \div -5 \%$ .

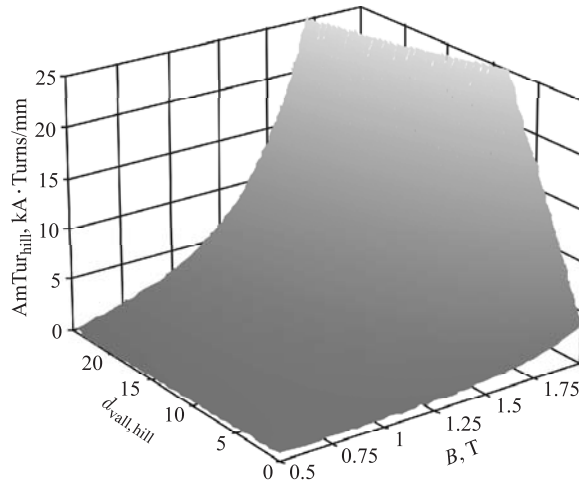


Рис. 3. Графическое представление двумерной зависимости для определения ампер-витков на единицу воздушного зазора  $AmTur_{hill}$  в районе секторов

**2.3. Зависимость**  $FieDif_{hill, vall} = f(B, d_{vall, hill})$ ;  $0,5 < B < 2,0$ ,  $1,5 < d_{vall, hill} < 25$ . Величина перепада уровней магнитного поля  $FieDif_{hill, vall}$  в районе секторов и в долинах магнитной структуры от среднего магнитного поля  $B$  и отношения воздушных зазоров  $d_{vall, hill}$  в долине и в районе секторов определяется по формуле вида

$$FieDif_{hill, vall} = (k_0 + k_2 \times B + k_4 \times \ln(d_{vall, hill}) + k_6 \times B^2 + k_8 \times (\ln(d_{vall, hill}))^2 + k_{10} \times B \times \ln(d_{vall, hill})) / (1 + k_1 \times B + k_3 \times \ln(d_{vall, hill}) + k_5 \times B^2 + k_7 \times (\ln(d_{vall, hill}))^2 + k_9 \times B \times \ln(d_{vall, hill})).$$

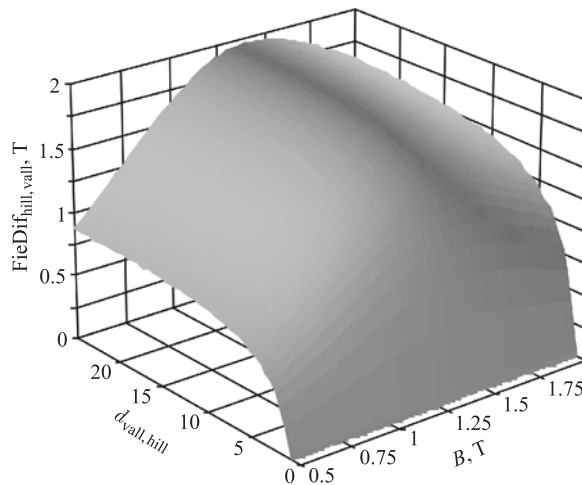


Рис. 4. Графическое представление двумерной зависимости для определения перепада уровней магнитного поля  $FieDif_{hill, vall}$  в районе секторов и в долинах магнитной структуры

Ниже представлены коэффициенты этой зависимости, и на рис. 4 отоброжено ее графическое представление.

$$k_0 = 0,001844899, \quad k_1 = -1,0778569, \quad k_2 = -0,00085883606, \quad k_3 = -0,011408802, \\ k_4 = 0,23317092, \quad k_5 = 0,41351787, \quad k_6 = 0,00048921454, \quad k_7 = 0,003162237, \\ k_8 = -0,04179965, \quad k_9 = 0,043875015, \quad k_{10} = 0,14439138.$$

В процессе сравнения данных перепада уровней магнитного поля  $FieDif_{hill, vall}$  в районе секторов и в долинах магнитной структуры, полученных по этой зависимости, с экспериментальными данными была определена неточность их вычисления в пределах  $+8 \div -6\%$ .

**2.4. Зависимость**  $F = f(B, d_{vall, hill})$ ;  $0,5 < B < 2, 1,5 < d_{vall, hill} < 25$ . Для определения зависимости флаттера  $F$  от среднего магнитного поля  $B$  и отношения воздушных зазоров в долине и в районе секторов  $d_{vall, hill}$  магнитной структуры используется формула вида

$$F = (g_0 + g_2 \times B + g_4 \times \ln(d_{vall, hill}) + g_6 \times B^2 + g_8 \times (\ln(d_{vall, hill}))^2 + \\ + g_{10} \times B \times \ln(d_{vall, hill})) / (1 + g_1 \times B + g_3 \times \ln(d_{vall, hill}) + g_5 \times B^2 + \\ + g_7 \times (\ln(d_{vall, hill}))^2 + g_9 \times B \times \ln(d_{vall, hill})).$$

Ниже представлены коэффициенты этой зависимости, и на рис. 5 отоброжено ее графическое представление.

$$g_0 = -0,0080627258, \quad g_1 = -1,0004107, \quad g_2 = -0,025489002, \quad g_3 = -0,19517653, \\ g_4 = 0,12772326, \quad g_5 = 0,37831192, \quad g_6 = 0,016029042, \quad g_7 = 0,050626375, \\ g_8 = 0,0092329886, \quad g_9 = 0,074609724, \quad g_{10} = -0,057478022.$$

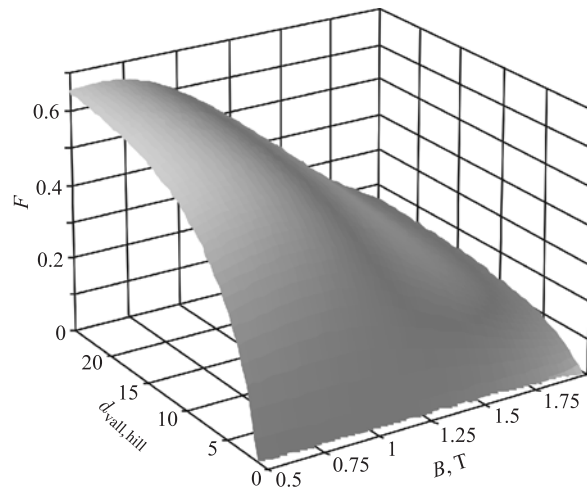


Рис. 5. Графическое представление двумерной зависимости для определения флаттера  $F$

В процессе сравнения данных флаттера  $F$ , полученных по этой зависимости, с экспериментальными данными была определена неточность их вычисления в пределах  $+13 \div -19\%$ .

**2.5. Зависимость**  $d_{\text{vall, hill}} = f(B, F)$ ;  $0,5 < B < 2,0$ ,  $0,02 < F < 0,7$ . Для определения зависимости отношения воздушных зазоров в долине и в районе секторов  $d_{\text{vall, hill}}$  магнитной структуры от среднего магнитного поля  $B$  и флаттера  $F$  используется формула вида

$$d_{\text{vall, hill}} = (h_0 + h_1 \times \ln(B) + h_2 \times (\ln(B))^2 + h_3 \times (\ln(B))^3 + h_4 \times \ln(F) + h_5 \times (\ln(F))^2) / (1 + h_6 \times \ln(B) + h_7(\ln(B))^2 + h_8 \times (\ln(B))^3 + h_9 \times \ln(F)).$$

Ниже представлены коэффициенты этой зависимости, и на рис. 6 отобразено ее графическое представление.

$$\begin{array}{lll} h_0 = -3,3870461, & h_1 = 3,8867933, & h_2 = 0,41973313, \\ h_3 = -7,3487012, & h_4 = 3,1914273, & h_5 = 0,39757636, \\ h_6 = 1,4210509, & h_7 = 2,9395, & \\ h_8 = 1,7711816, & h_9 = 2,3284448. & \end{array}$$

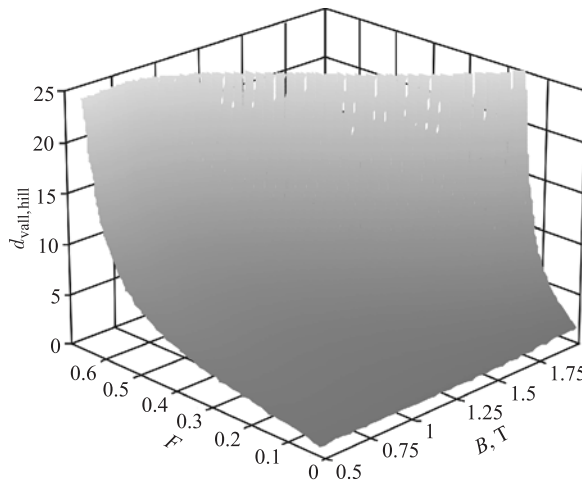


Рис. 6. Графическое представление двумерной зависимости для определения отношения воздушных зазоров  $d_{\text{vall, hill}}$

В процессе сравнения данных отношения воздушных зазоров в долине и в районе секторов  $d_{\text{vall, hill}}$ , полученных по этой зависимости, с экспериментальными данными была определена неточность их вычисления в пределах  $+23 \div -9\%$ .

**2.6. Зависимость**  $F = f(\text{AmTur}_{\text{hill}}, d_{\text{vall, hill}})$ ;  $0,6 < \text{AmTur}_{\text{hill}} < 25$ ,  $1,5 < d_{\text{vall, hill}} < 25$ . Для определения зависимости флаттера  $F$  от величины ампер-витков на единицу воздушного зазора в районе секторов  $\text{AmTur}_{\text{hill}}$  и отношения воздушных

зазоров  $d_{\text{vall, hill}}$  в долине и в районе секторов магнитной структуры используется формула вида

$$F = (c_0 + c_2 \times \ln(\text{AmTur}_{\text{hill}}) + c_4 \times d_{\text{vall, hill}} + c_6 \times (\ln(\text{AmTur}_{\text{hill}}))^2 + c_8 \times (d_{\text{vall, hill}})^2 + c_{10} \times d_{\text{vall, hill}} \times \ln(\text{AmTur}_{\text{hill}})) / (1 + c_1 \times \ln(\text{AmTur}_{\text{hill}}) + c_3 \times d_{\text{vall, hill}} + c_5 \times (\ln(\text{AmTur}_{\text{hill}}))^2 + c_7 \times d_{\text{vall, hill}}^2 + c_9 \times d_{\text{vall, hill}} \times \ln(\text{AmTur}_{\text{hill}})).$$

Ниже представлены коэффициенты этой зависимости, и на рис. 7 отображено ее графическое представление.

$$\begin{aligned} c_0 &= -0,23882947, & c_1 &= -0,094081445, & c_2 &= -0,028164011, & c_3 &= 0,22309093, \\ c_4 &= 0,21180831, & c_5 &= 0,69161584, & c_6 &= 0,024887266, & c_7 &= 0,0014473193, \\ c_8 &= -0,00039530272, & c_9 &= -0,041767806, & c_{10} &= -0,024363604. \end{aligned}$$

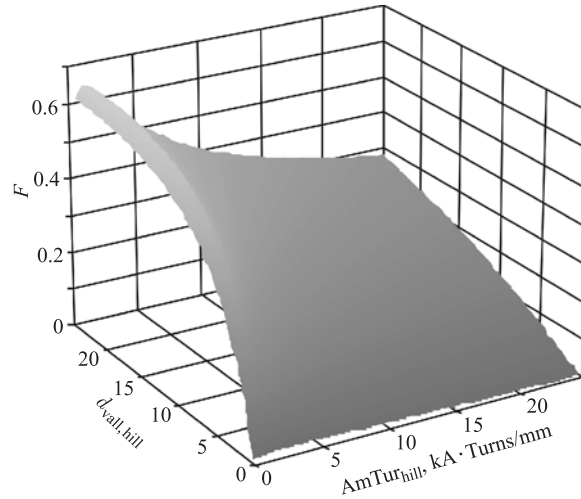


Рис. 7. Графическое представление двумерной зависимости для определения флаттера  $F$

В процессе сравнения данных флаттера  $F$ , полученных по этой зависимости, с экспериментальными данными была определена неточность их вычисления в пределах  $+12 \div -17\%$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в работе двумерные аналитические зависимости параметров магнитных структур циклотронов могут быть использованы для предварительного анализа и определения основных физических и геометрических параметров магнитных структур циклотронов с прямыми и спиральными секторами, близких азимутально-симметричным.

Практика показала, что применение данных зависимостей с показанными пределами неточностей удовлетворяет требованиям для предварительного расчета параметров магнитных структур и магнитов циклотронов и точность расчета достаточна для их дальнейшего использования в более точных 3D-программных приложениях.



Двумерные аналитические зависимости параметров магнитных структур были получены в результате обработки баз данных реально работающих или проектируемых циклотронов. Диапазон применимости этих зависимостей ограничен средним магнитным полем не более 2 Тл, отношением воздушных зазоров в долине и в районе секторов не более 25 и углом спиральных секторов не более 40°.

Некоторые из рассмотренных двумерных аналитических зависимостей легли в основу разработки программного приложения CyclSyntWin, используемого в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ в качестве инструмента для предварительного синтеза и оптимизации основных параметров магнитных структур и магнитов циклотронов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Holsinger R., Iselin C.* CERN-POISSON Program Package (POISCR) User. Guide. Geneva, 1984 (unpublished).
2. ANSYS <http://www.ansys.com/>
3. OPERA/TOSCA Reference Manual. Oxford: Vector Fields Limited, 1994.
4. *Dubrovina A. N.* User's Guide MERMAID: Magnet Design in Two and Three Dimensions. Novosibirsk: SIM Limited, 1994. P. 3–60.
5. *Kukhtin V., Lamzin E., Sytchevsky S.* Magnetic Field Formation in Cyclotrons on the Basis of 3D Numerical Simulations // Book of Abstracts of XXXIV Eur. Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2005), Oct. 6–8, 2005.
6. *Sytchevsky S. et al.* Numerical Technology for Design, Development & Measurements of Magnet Systems in Cyclotrons // Book of Abstracts of XXXV Eur. Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2006), Nov. 2–4, 2006.
7. *Franko J. et al.* Urýchľovač ťažkých iónov U 200 B. Fyzikálno-technické zdôvodnenie. UKJF 93/88. Bratislava, 1988.
8. *Сенченко В.А.* Предельно быстрый алгоритм построения ортонормированной системы полиномов от многих переменных на произвольном дискретном множестве. Препринт ОИЯИ Р5-85-724. Дубна, 1985.
9. *Гульбекян Г.Г., Франко Й.* Алгоритм синтеза и анализа характеристик магнитных структур изохронных циклотронов с цилиндрическими полюсами. Препринт ОИЯИ Р9-92-129. Дубна, 1992.
10. *Борисов О.Н. и др.* Циклотронная лаборатория (CyLab) при Словацком метрологическом институте. Препринт ОИЯИ Р9-97-86. Дубна, 1997.
11. *Ivanenko I. et al.* The Model of DC 72 Cyclotron Magnet. The Research of the Sector Shimming Methods for Obtaining the Working Magnetic Field for Light and Heavy Ions Acceleration // Proc. of 8th Eur. Particle Accelerator Conf. Paris, 2002.
12. *Gikal B. N. et al.* The Project of a Specialized Accelerator DC 60 Designed for the Interdisciplinary Laboratory Complex: Abstract // 3rd Intern. Conf. on Nuclear and Radiation Physics, Almaty, Kazakhstan, 2001. P. 52–53.
13. *Гульбекян Г.Г. и др.* Ускорительный комплекс ДЦ-350 // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 4(160). С. 424–445.
14. *Gulbekian G. G. et al.* A Method of the Magnetic Field Formation in Cyclotron DC-72 // Nukleonika. 2003. V. 48, No. 4. P. 207–210.
15. *Gulbekian G. et al.* DC-72 Cyclotron Magnetic Field Formation // Proc. of Conf. «RuPAC 2004», XIX Rus. Particle Accelerator Conf., Dubna, 2004.

Получено 11 июля 2013 г.