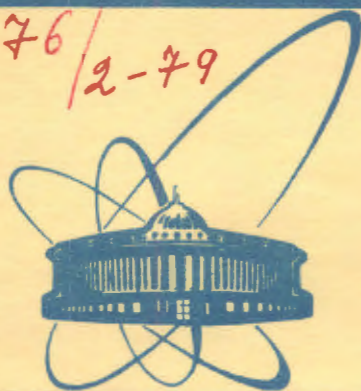


5176/2-79



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

17/12-79

3-328

P9 - 12587

Н.Л.Заплатин, Н.А.Морозов

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ  
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ФАЗОТРОНА  
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ

1979

Расчетная модель магнитной системы фазотрона  
с пространственной вариацией магнитного поля

Проведен расчет магнитного поля модели магнитной системы фазотрона с пространственной вариацией поля на энергию протонов 680 МэВ при помощи системы программ POISSON. На основании сравнения расчетов с результатами экспериментальных исследований показано, что точность расчета среднего магнитного поля для различных конфигураций магнитной системы составила ~5%. Выполнены расчеты влияния различных шиммирующих элементов с точностью не хуже 10%, найдено распределение магнитного поля для системы корректирующих катушек с точностью 5%, учтено влияние изменений, внесенных в конструкцию магнитной системы фазотрона. Рассчитаны силы, действующие на различные элементы магнитной системы. Проведенные расчеты показали возможность эффективного использования системы программ POISSON для сложных магнитных систем, содержащих спиральные и кольцевые шиммы, на этапе шиммирования магнитного поля, что дает возможность значительно сократить объем экспериментальных исследований.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

The Calculation Model of a Magnet System of a Phasotron  
with a Space Variation of a Magnetic Field

The magnetic field calculation of the magnet system model of the phasotron with the space variation of magnetic field with proton energy of 680 MeV by means of the POISSON program is given. On the base of comparing the results of calculation with experiment it is shown that the accuracy of average magnetic field calculation for various configurations of the magnet system is about 5 percent. The calculations of different shimming elements influence have been performed with the accuracy better than 10 percent. The magnetic field contribution for the trim coils has been found with the accuracy of 5 percent and the influence of the changes in the construction of the phasotron's magnet system have been calculated. The forces acting on various elements of the magnet system have been calculated. The calculations show the effectivity of using POISSON program for complicated magnetic systems with spiral and ring shimmes during their construction and during shimming of the magnetic field. This gives a considerable decreasing of the experimental work.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

В работах<sup>/1,2/</sup> показано, что предварительное моделирование азимутальной протяженности и высоты расположения спиральных шимм фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля /установка "Ф"/ можно осуществить расчетным способом, используя метод сеток /программа TRIMA /, при этом точность определения глубины вариации магнитного поля составила 1-5%. Однако использование программы TRIMA для расчета среднего магнитного поля системы, содержащей спиральные шиммы, позволяет оценить поле лишь в холме спиральной шиммы с точностью 5-15%, что недостаточно для получения количественных характеристик сложных магнитных систем на стадии расчетного моделирования.

В данной работе представлены результаты расчета магнитного поля для модели магнитной системы установки "Ф"<sup>/3/</sup> с помощью системы программ POISSON<sup>/4/</sup>. Расчет проводился для начальной и конечной геометрий модели магнитной системы установки "Ф". На рис. 1 показаны конфигурация Ш-образного магнита СП-57 и схема спиральных и кольцевых шимм модели. Расчеты проводились в предположении аксиальной симметрии всех элементов магнитной системы. Отличие углового размера магнитной системы от 360° в области, занятой спиральными шиммами, и в области ярма учитывалось введением в расчет коэффициентов заполнения для этих областей, графики которых приведены на рис. 2. Результаты расчета среднего магнитного поля для начальной и окончательной геометрии модели магнитной системы установки "Ф" в сравнении с экспериментальными результатами приведены на рис. 3 /кривые 1 и 2/.

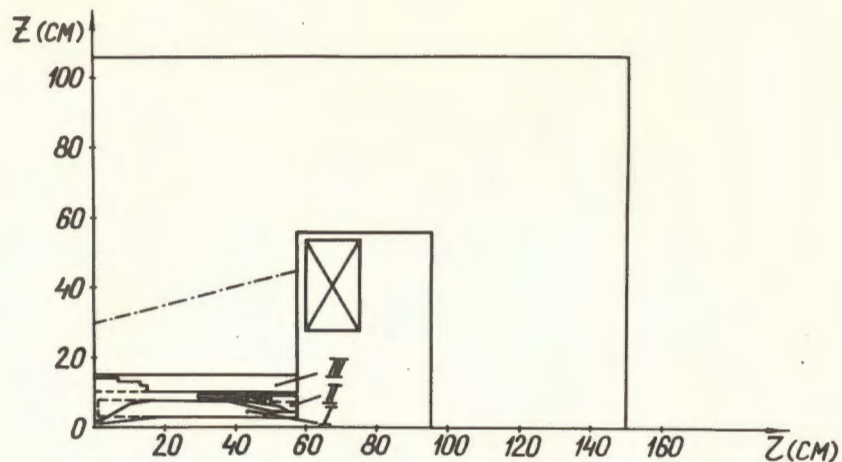


Рис.1. Схема геометрии модели магнитной системы установки "Ф". - - - - начальная геометрия; ——— окончательная геометрия; - - - - часть полюса, использованная в расчете с фиктивным ярмом; I - спиральные шиммы; II - стальное кольцо; III - стальной диск.

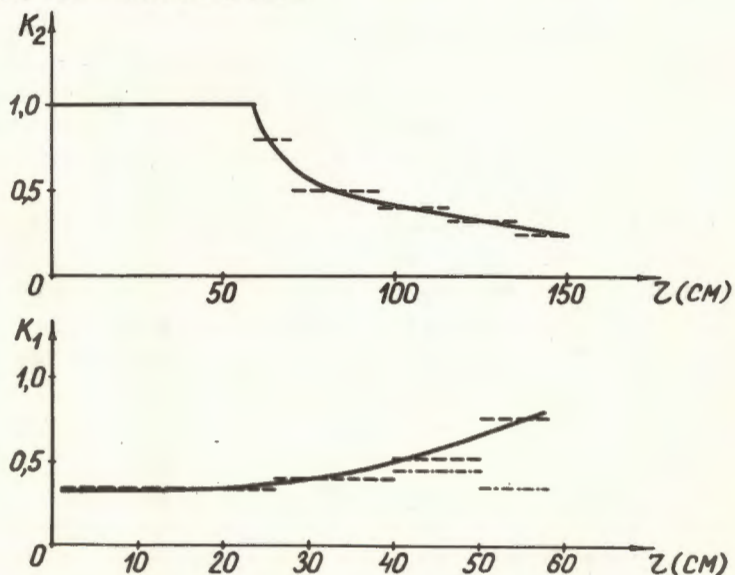


Рис.2. Коэффициенты заполнения:  $K_1$  - область спиральных шимм;  $K_2$  - область ярма; ——— реальная геометрия; - - - геометрия расчета с ярмом СП-57; ····· геометрия расчета с фиктивным ярмом.

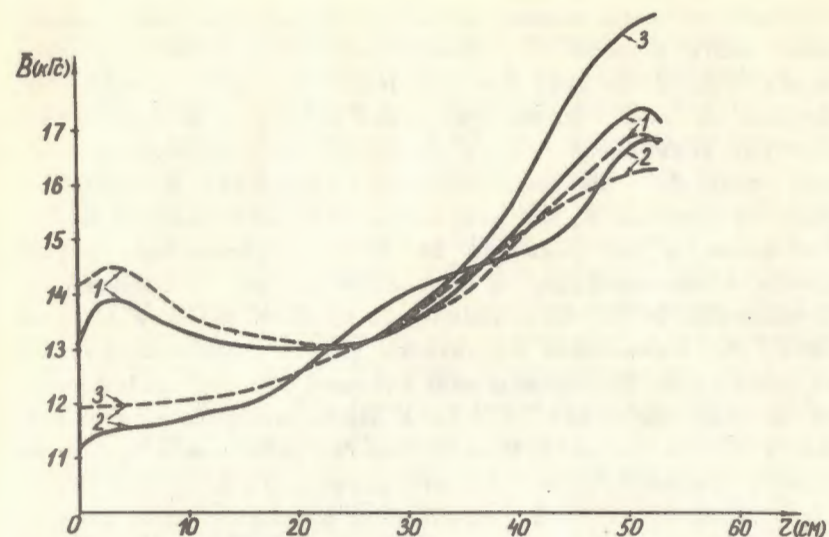
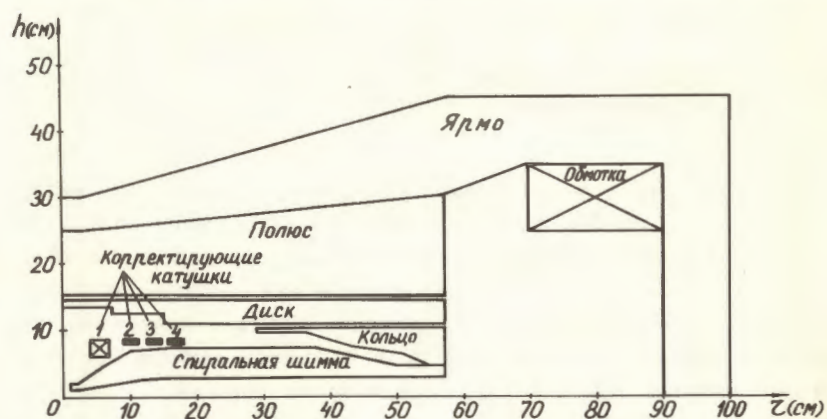


Рис.3. Среднее магнитное поле модели магнитной системы установки "Ф". 1 - начальная геометрия; 2 - окончательная геометрия; 3 - геометрия с фиктивным ярмом; ——— расчет; - - - эксперимент.

Видно, что расчеты позволяют получить среднее магнитное поле с точностью 5%. Основной вклад в эту ошибку дает недостаточное количество узлов сетки в области спиральных и кольцевых шимм. Таким образом, использование системы программ POISSON может дать такие количественные результаты по величине среднего магнитного поля на этапе выбора параметров магнитных систем со спиральными шиммами, которые позволяют устранить значительный объем экспериментальных работ с отдельными элементами магнитных систем.

В процессе шиммирования магнитных систем основным методом определения величины изменений, вносимых в среднее магнитное поле различными элементами, являлся метод равномерного намагничивания, который для сложных магнитных систем /типа установки "Ф"/ давал точность ~ 30%. Для повышения точности расчета влияния различных элементов магнитной системы установки "Ф" были проведены расчеты при помощи системы программ POISSON. Из-за ограниченного числа узлов сетки / $\leq 1200$ / для получения расчетной модели была выделена область

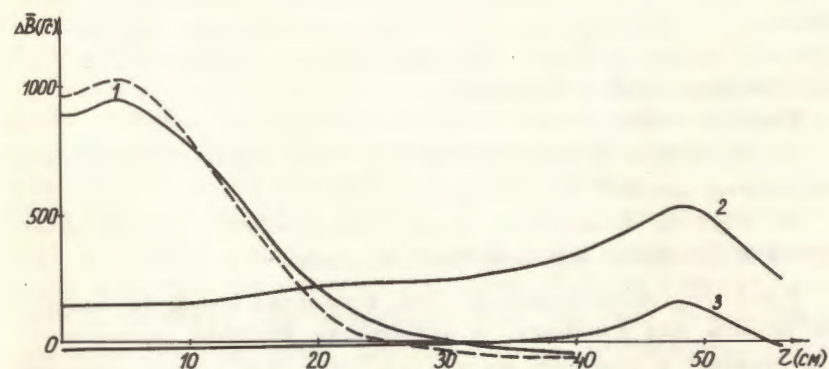
магнитной системы вблизи медианной плоскости с включением только части полюсного наконечника. Часть полюсного наконечника, использованная для получения этой расчетной модели, отмечена на *рис. 1* штрихпунктирной линией, а вся расчетная геометрия показана на *рис. 4*. В геометрию спиральных и кольцевых шимм были внесены следующие упрощения: в спиральной шимме со стороны  $h_1$  для радиуса 2 см убрав кольцевой вырез, со стороны  $h_2$  для радиусов 38-50 см ступенчатый профиль заменен прямолинейным, в кольцевой шимме со стороны  $h_1$  для радиусов 36-55 см ступенчатый профиль заменен ломаной линией. Для замыкания магнитного потока было использовано фиктивное ярмо, источником поля служила обмотка возбуждения, максимально удаленная от полюса. Проницаемость и положение ярма, а также ток возбуждения обмотки выбирались так, чтобы получить нужный уровень среднего магнитного поля. При расчете для области, занятой спиральными шиммами, были введены



*Рис. 4.* Расчетная геометрия с фиктивным ярмом.

коэффициенты заполнения /штриховая линия *рис. 2*/. Результаты расчета этой геометрии представлены на *рис. 3* /кривая 3/. Всплеск среднего магнитного поля в области конечных радиусов  $r \geq 30$  см связан с увеличением доли магнитного потока из-за искажений в области полюса и ярма. При вычислении вкладов различных элементов магнитной системы, находящихся в этом диапазоне радиусов, это могло привести к ошибкам до 15%.

Чтобы перераспределить магнитный поток и получить распределение индукции, соответствующее экспериментальному результату, были уменьшены коэффициенты заполнения спиральных шимм для области радиусов  $r \geq 40$  см /штрихпунктирная линия *рис. 2*/. При этом расчетное среднее магнитное поле совпало с результатом эксперимента /штриховая линия 2 *рис. 3*/ с точностью 1%, за исключением области радиусов  $r \leq 2$  см, где точность расчета составила 10%. Для оценки точности расчета различных элементов магнитной системы было проведено сравнение расчета и эксперимента для вклада центральной ступенчатой проточки в диске. На *рис. 5* приведены эти результаты /кривые 1/. Видно, что точность расчета вклада этого элемента составляет 10%, и эта ошибка является максимальной при определении вкладов элементов /при помощи расчетной модели/, т.к. в центральной области имеется наибольшее отличие распределения магнитной индукции от реального. При экспериментальном моделировании для того, чтобы выбрать форму этой проточки, потребовалось провести десятки экспериментов. Результаты расчета показывают, что подобная расчетная модель позволяет значительно сократить объем экспериментальных работ путем численного моделирования. С помощью расчетной



*Рис. 5.* Величины вкладов элементов магнитной системы. — — — расчет; - - - - эксперимент; 1 - вклад ступенчатой проточки в центре диска; 2 - вклад зазора между полюсом и диском; 3 - влияние перекоса диска.

модели были рассчитаны вклады элементов, которые не были промоделированы на модели, но появились в конструкции магнитной системы установки "Ф".

Были рассчитаны:

1/. Влияние центрального отверстия в диске для вертикального источника / $\phi 40$  мм;  $h_1=13,1$  см;  $h_2=14,8$  см/. Оно оказало равным 10 Гс с протяженностью  $\Delta r=20$  см. Влияние отверстия в ярме и полюсе / $\phi 50$  мм/ с помощью подобной расчетной модели выделить уже невозможно, но, как показали измерения влияния подобного отверстия на изохронном циклотроне У-120М, оно составляет ~10 Гс с такой же протяженностью.

2/. Влияние кольцевой проточки в этом же диске для расклинивающего устройства / $r_1=18$  см,  $r_2=19$  см,  $h_1=13$  см,  $h_2=14,8$  см/. Величина ее вклада - 10 Гс, протяженность -  $\Delta r=30$  см.

3/. Влияние зазора между полюсным наконечником и диском / $r_1=0$  см,  $r_2=57,5$  см,  $h_1=14,8$  см,  $h_2=15,1$  см/. Вклад этого зазора приведен на рис. 5 /кривая 2/.

4/. Влияние изгиба диска относительно полюсного наконечника /диск на радиусе, равном 20 см, опускается на 1 мм, при этом на конечном радиусе диск жестко фиксируется/. Вносимое при этом возмущение среднего магнитного поля показано на рис. 5 /кривая 3/.

При помощи расчетной модели были рассчитаны возмущения, вносимые в среднее магнитное поле различными элементами, которые предполагается использовать в установке "Ф" для шиммирования магнитного поля.

Были рассчитаны:

1/. Вклады в среднее магнитное поле боковых накладок на спиральные шиммы /рис. 6, кривые 1 и 2/.

2/. Вклады кольцевых шимм, помещенных в зазоре между диском и кольцевой шиммой /рис. 6, кривые 3 и 4/.

В работе <sup>15/</sup> было показано, что, используя подобную расчетную модель для изохронного циклотрона У-120М, можно получить вклады в среднее магнитное поле для корректирующих катушек с точностью 2-5%. Так как для установки "Ф" система токовых корректирующих катушек экспериментально не моделировалась, вклады корректирующих катушек /рис. 4/ были получены расчетным способом. Результаты расчета системы токо-

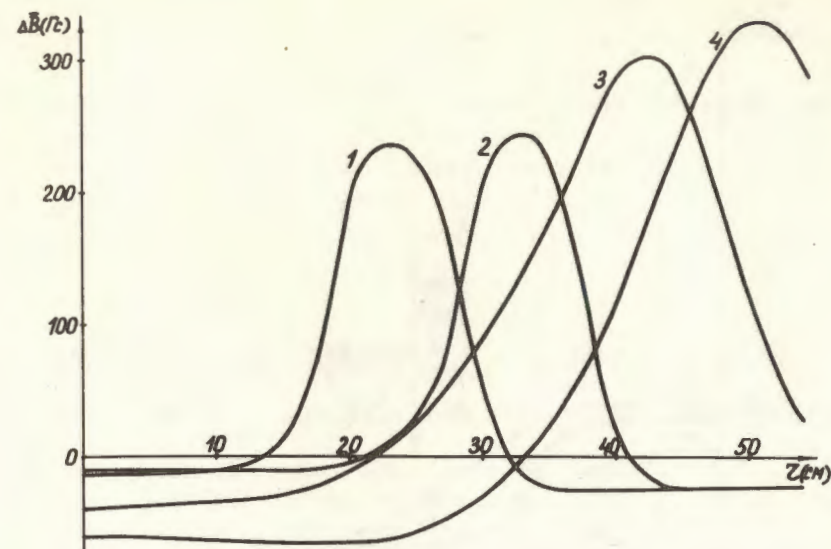


Рис.6. Возмущения по среднему магнитному полю от шиммирующих элементов: 1 - боковая накладка на спиральную шимму,  $\Delta r=19-29$  см,  $\Delta\phi=2,7^\circ$ ; 2 - то же для  $\Delta r=29-38$  см,  $\Delta\phi=2,7^\circ$ ; 3 - секторная шимма,  $\Delta r=39-48$  см,  $\Delta h=10,5-11$  см; 4 - то же для  $\Delta r=48-57$  см,  $\Delta h=10,5-11$  см.

вых корректирующих катушек установки "Ф" приведены на рис. 7а для максимальных токов возбуждения катушек. Использование подобных расчетных моделей может также позволить оптимизировать количество и положение корректирующих катушек на стадии выбора параметров токовых систем.

При проектировании магнитных систем представляет интерес знание магнитных усилий, действующих на элементы магнитных систем. Расчеты по системе программ POISSON также позволяют определить эти характеристики. На рис. 7б показаны результаты расчета силы, действующей на центральную часть одной спиральной шиммы / $\Delta r=0-20$  см/ в зависимости от тока возбуждения. Расчеты суммарных усилий, действующих на все элементы магнитной системы, дали величину 24 Т, что хорошо согласуется с результатами эксперимента / $22 \pm 3$  Т/.

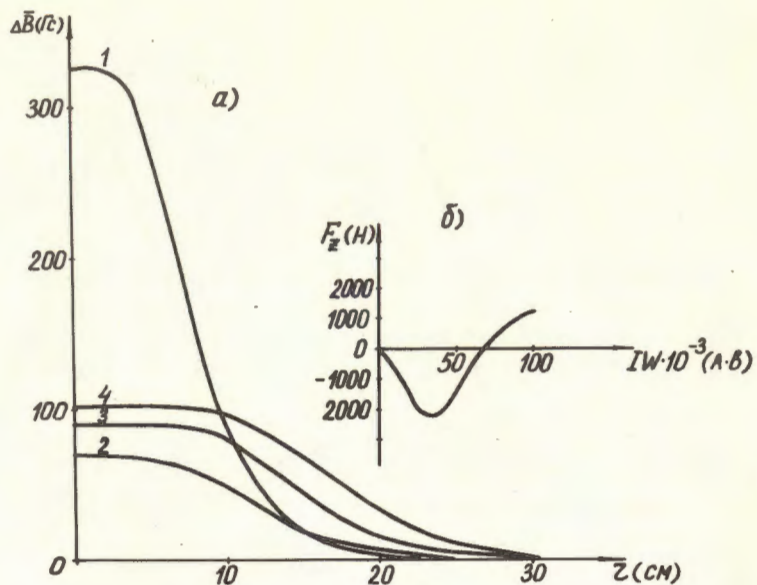


Рис. 7. а/. Вклады корректирующих катушек.  
 1 -  $r_{\text{ср}} = 5,4$  см,  $h_{\text{ср}} = 7,3$  см,  $IW = 9600$  А·В;  
 2 -  $r_{\text{ср}} = 9,8$  см,  $h_{\text{ср}} = 8,1$  см,  $IW = 1530$  А·В;  
 3 -  $r_{\text{ср}} = 13,4$  см,  $h_{\text{ср}} = 8,1$  см,  $IW = 1530$  А·В;  
 4 -  $r_{\text{ср}} = 16,5$  см,  $h_{\text{ср}} = 8,1$  см,  $IW = 1530$  А·В;  
 б/. Сила, действующая на центральную часть спиральной шиммы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование расчетных моделей на основе системы программ POISSON для сложных магнитных систем, содержащих спиральные и кольцевые шиммы, позволяет:

- 1/. На этапе выбора конфигурации ферромагнитных элементов получить расчет среднего магнитного поля с точностью 5%.
- 2/. На этапе шиммирования магнитного поля получить расчеты вкладов различных элементов с точностью не хуже 10%.
- 3/. Путем расчета магнитного поля корректирующих катушек с точностью 3-5% оптимизировать их количество и положение при выборе параметров токовых систем.

4/. Оценить величину усилий, действующих на элементы магнитных систем, что необходимо при их конструировании.

Авторы благодарят С.Б.Ворожцова и Т.Н.Дудареву за помощь, оказанную при освоении системы программ POISSON, Ю.Г.Аленицкого за участие в получении экспериментальных результатов и Г.Н.Сайфулину за оформление работы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Аленицкий Ю.Г., Ворожцов С.Б., Заплатин Н.Л. ОИЯИ, Р9-7412, Дубна, 1973.
2. Аленицкий Ю.Г., Ворожцов С.Б., Заплатин Н.Л. ОИЯИ, 9-9034, Дубна, 1975.
3. Аленицкий Ю.Г. и др. ОИЯИ, Р9-5246, Дубна, 1970.
4. Ворожцов С.Б. и др. ОИЯИ, В1-11-12070, Дубна, 1978.
5. Ворожцов С.Б., Дударева Т.Н., Заплатин Н.Л. ОИЯИ, Б1-9-10998, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 июня 1979 года.