

01;10

Особенности конструирования магнитных систем ряда современных компактных изохронных циклотронов с использованием методов математического моделирования

© П.В. Богданов, В.П. Кухтин, Е.А. Ламзин, Ю.И. Стогов, С.Е. Сычевский

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова,
196641 Металлострой, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: sytch@niiefa.sintez.spb.su

(Поступило в Редакцию 29 января 2010 г.)

Описываются особенности конструирования магнитных систем компактных изохронных циклотронов с использованием методов математического моделирования. Предложенный подход на базе математического синтеза электромагнитов циклотронов позволил разработать, изготовить, наладить и сдать в эксплуатацию ряд ускорителей, обладающих общими конструктивными чертами. Разработанные системы подвижных шиммов позволяют эффективно перестраивать распределения магнитного поля для обеспечения режимов ускорения различных типов ионов.

Введение

Определение параметров и формирование магнитной структуры современных циклотронов в значительной степени базируются на результатах детального численного моделирования поля и закономерностях его поведения в зависимости от особенностей конструктивного исполнения магнитных систем циклотронов. Магнитное поле в циклотронах имеет сложную пространственную конфигурацию, а точность формирования изохронной зависимости поля, вытекающая из требований, определяемых динамикой и качеством пучка заряженных частиц, характеризуется погрешностью $10^{-3} - 10^{-4}$ [1–5].

К настоящему времени усилиями различных групп разработчиков создан [6–9] комплексный метод формирования магнитного поля циклотрона, сочетающий в себе предварительный анализ и выбор основных размеров магнитной структуры, проведение ее оптимизации и формирование магнитного поля при помощи трехмерных расчетов, проведение измерений и формирование поля на электромагните циклотрона. Такой подход позволяет интегрировать усилия различных специалистов на всех стадиях разработки и создания циклотронного комплекса оборудования, включая магнитную систему. Он также дает возможность эффективно использовать накопленный опыт предыдущих разработок, сочетать трудно формализуемые требования технологического и экономического характера с вычислительными методами синтеза прецизионных нелинейных магнитных систем.

В настоящей работе описан единообразный подход, который был применен при проектировании магнитных систем ряда изохронных циклических ускорителей, разработанных и изготовленных в ФГУП „Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова“ в период с 2002 по 2009 г. Эти магнитные системы ускорителей имеют ряд общих черт, таких как:

1) магнитопровод броневого типа цилиндрической формы;

2) средняя часть магнитопровода (стойка) выполняет функцию корпуса камеры;

3) полюсные наконечники, с приваренными к ним кольцевыми пластинами, являются крышками вакуумной камеры;

4) структура, формирующая изохронное поле, — четыре пары секторов;

5) боковые накладки на секторы, при помощи которых формируется поле, имеют расчетный профиль, без спиральности;

6) элементы центральной области, формирующие поле в центре электромагнита, имеют аксиальные от-

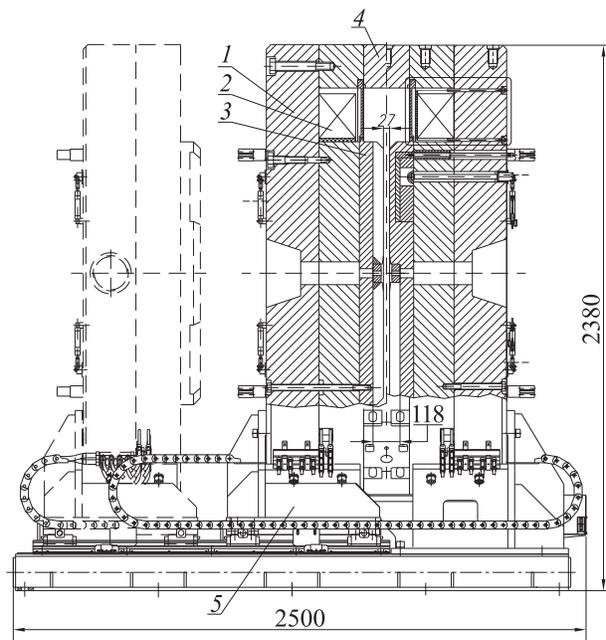


Рис. 1. Электромагнит циклотрона СС 18/9 (продольное сечение): 1 — магнитопровод, 2 — катушка обмотки возбуждения, 3 — полюсный наконечник, 4 — стойка магнитопровода (корпуса камеры), 5 — основание.

верстия для инъекции пучка в ускорительную камеру и токовода к инфлектору, а в балках электромагнита выбраны аксиальные полости для размещения элементов системы внешней инъекции пучка (рис. 1);

7) в центральной стойке (корпус камеры) выполнены отверстия для вакуумной откачки, для ввода в камеру и крепления пробников, обдирочных устройств, отверстие для вывода пуска из ускорительной (вакуумной) камеры и отверстия для вспомогательного оборудования (рис. 2, *a*);

8) медианная плоскость электромагнита расположена вертикально (рис. 2, *b*);

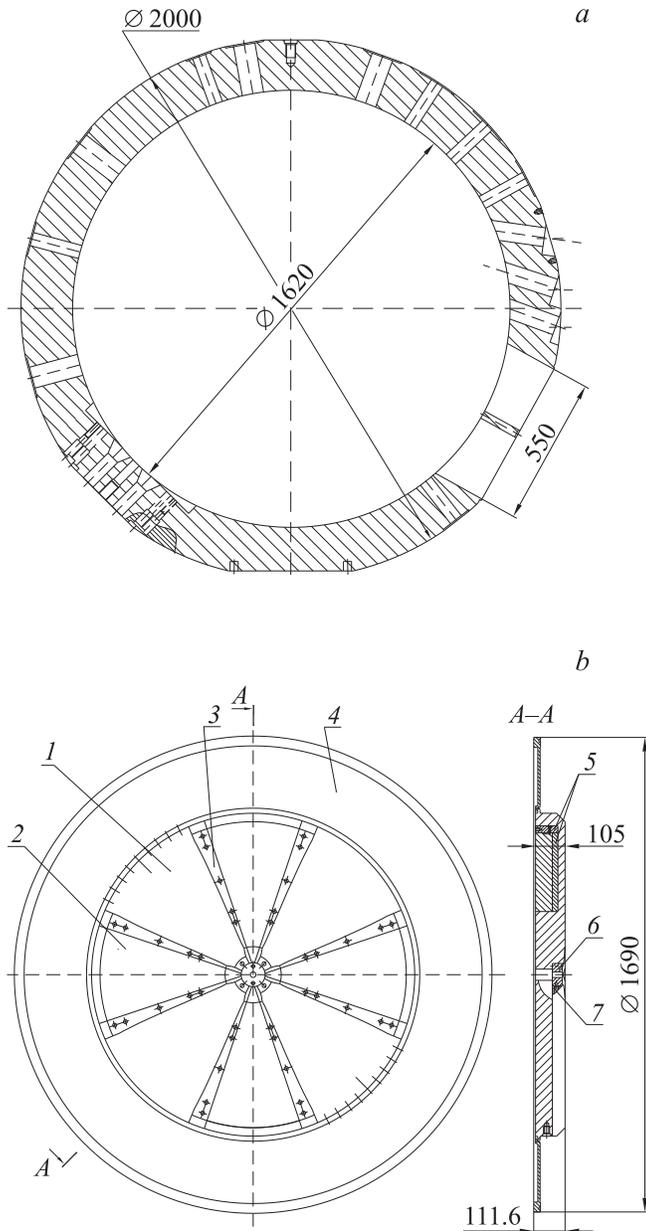


Рис. 2. *a* — типичное поперечное сечение магнитопровода (корпус камеры), *b* — типичный полюсный наконечник (общий вид); 1 — полюсный наконечник, 2 — сектор, 3 — боковой шимм, 4 — кольцевая пластина, 5 — подвижный шимм, 6 — магнитная пробка, 7 — центральный шимм.

9) магнит с целью обеспечения доступа к оборудованию, расположенному внутри вакуумной камеры (в полости магнитопровода), разделен на неподвижную и подвижную части, каждая из которых закреплена на отдельной опоре, базирующейся на общей раме;

10) подвижная опора установлена на специальные прецизионные рельсы и снабжена электромеханическим приводом;

11) расстояние, на которое отодвигается подвижная часть магнита (балка, полюсный наконечник, стойка, катушка, обмотки) от неподвижной части, составляет 800 mm.

Выбор метода шиммирования электромагнитов циклотронов

Первый этап разработки магнитной системы заключается в выборе основных параметров магнитной структуры циклотрона, к которым относятся геометрические размеры магнита, ампер-витки катушек возбуждения и основной метод шиммирования секторов магнита. Выбор этих параметров определялся в первую очередь принципами и ограничениями, обусловленными общей компоновкой ускорителя, включающей помимо магнитной системы ускоряющую высокочастотную систему, вакуумную систему, систему внешней инъекции, систему экстракции пучка заряженных частиц и др.

Назначение циклотрона, в частности тип и конечная энергия ускоряемых ионов, диктует выбор типа магнитных шиммов [10,11] для обеспечения изохронности с учетом перестройки поля при изменении типа ускоряемых ионов (отрицательных ионов водорода H^- или дейтерия D^-). Циклотроны СС 18/9 и СС 30/15 предназначены для ускорения двух типов частиц — ионов H^- и ионов D^- , в то время как СС 12 — только H^- . Для первых двух ускорителей перестройка поля выполняется за счет перемещаемых ферромагнитных шиммов, „изохронные“ поля для всех режимов ускорения формируются за счет использования системы неподвижных и подвижных шиммов. Поле ускорителя СС 12 формировалось только с использованием системы неподвижных шиммов. В качестве основного метода для выбора неподвижных шиммов всех трех ускорителей был принят метод азимутального шиммирования с профилированием боковых секторных накладок в зависимости от радиуса.

Особенности построения моделей пространственного магнитостатического поля и пондеромоторных нагрузок прецизионной магнитной системы циклотрона

Вычислительные модели для анализа пространственного распределения поля были разработаны на базе комплекса вычислительных программ

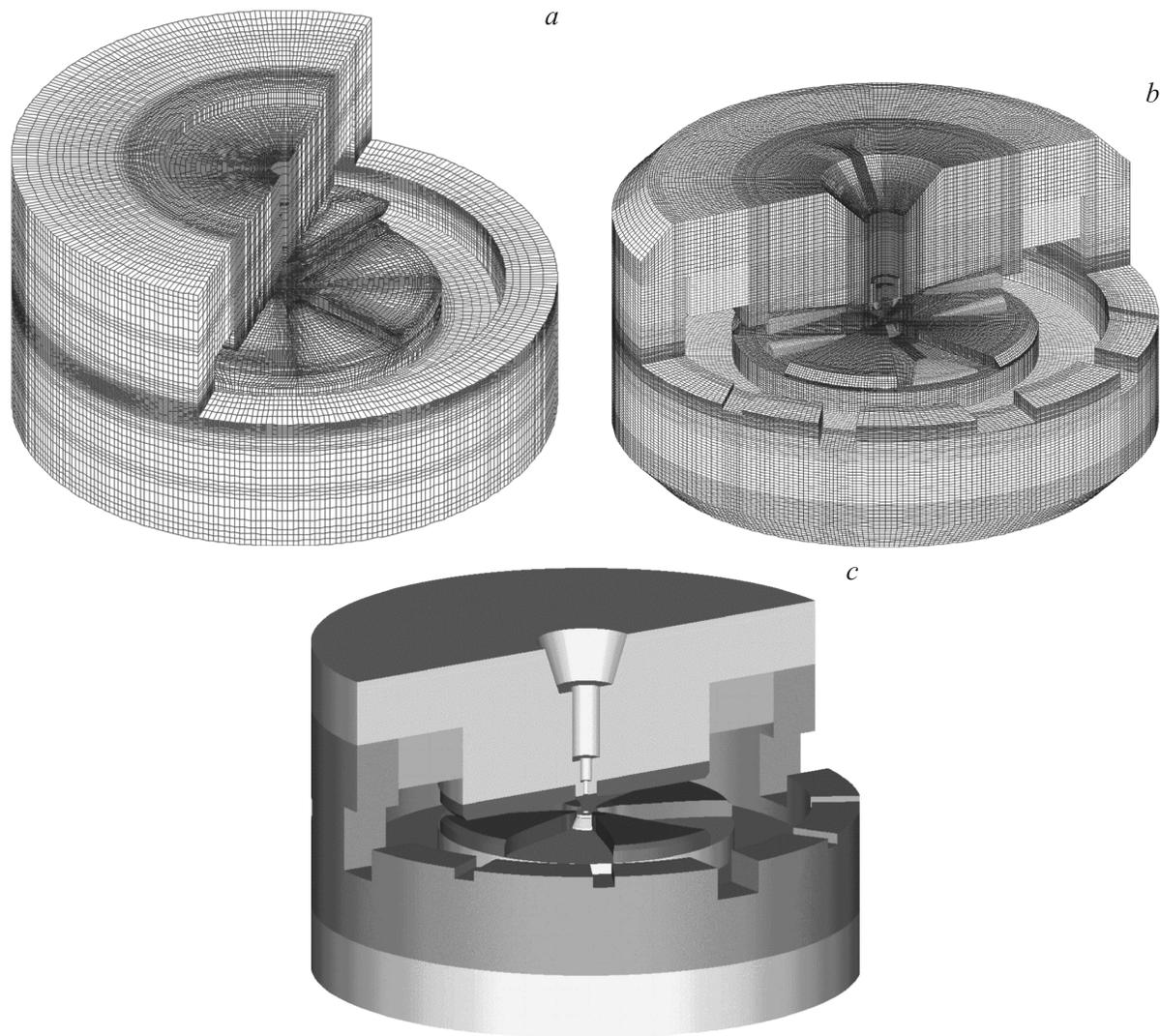


Рис. 3. *a* — конечно-элементная модель магнитной системы циклотрона СС 18/9 (в воздухе расчетная сетка не показана); *b* — конечно-элементная модель магнитной системы циклотрона МСС 30/15 (в воздухе расчетная сетка не показана); *c* — фотореалистическое изображение магнитной системы циклотрона СС 12, построенное на основе конечно-элементной модели.

СОМРОТЕ/МР [12] — последней версии программного комплекса КОМРОТ [13,14], развитого по инициативе авторов, для численного моделирования прецизионных магнитных систем. Детальное описание этого комплекса программ выходит за рамки данной работы. Тем не менее следует отметить важную особенность комплекса программ СОМРОТЕ/МР, связанную с обеспечением возможности варьирования границ ферромагнитных материалов в конечно-элементной вычислительной модели с целью расчетов функций влияния и дальнейшего синтеза магнитной системы за счет выбора формы этих границ. При этом сама форма границ достаточно сложна, а требования к точности ее описания по фиксированному набору точек составляют несколько микронметров.

В частности, для проведения расчетов циклотронов были разработаны:

— генератор расчетной сетки на основе параметрического описания конструкции на специально разработанном языке (примеры пространственных конечно-

элементных сеток для СС 18/9 и МСС 30/15 приведены на рис. 3, *a, b*);

— дополнительные модули к генератору сетки, позволяющие параметрически описывать сложные криволинейные поверхности, в частности, профилированную поверхность сектора (для СС 12 — см. рис. 3, *c*);

— „интерполятор“, позволяющий находить поле в любой требуемой точке, в частности, для построения карты поля с заданным шагом по углу, радиусу и высоте (для СС 12 — см. рис. 4);

— средства расчета интегральных характеристик поля, таких как радиальное распределение среднего поля, флаттера, а также гармонического анализа поля в цилиндрической системе координат.

Следует отметить, что комплекс программ многократно использовался для решения задач численного моделирования различных типов магнитных систем, он верифицирован путем сопоставления с данными магнитных измерений.

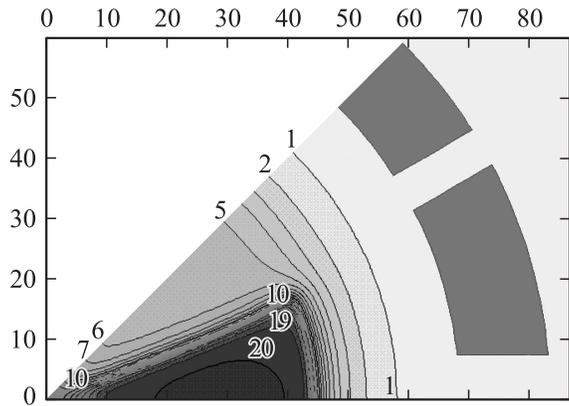


Рис. 4. Расчетное распределение магнитного поля (модуля индукции, kGs) в медианной плоскости для циклотрона СС 12.

Развитые препроцессорные и постпроцессорные средства позволяют эффективно организовывать решение совместных задач, в частности, проводить совместный магнитостатический и траекторный (с использованием трехмерной карты магнитного поля, показанной для СС 12 на рис. 4) анализ рабочих режимов циклотрона [6,15].

Данные расчетов сил, действующих на ферромагнитные и токонесущие элементы конструкции, передаются так же в комплексы программ для решения задач прочности и нахождения деформации конструкции [16], поскольку деформация влияет на поле в зазоре магнита. Это позволяет построить процедуру требуемой глубины вложенности для решения ряда самосогласованных задач по формированию требуемого поля в циклотроне.

Стальные элементы магнитопровода циклотрона находятся в состоянии сильного насыщения в силу характера распределения потока вектора магнитной индукции. Это требует задания основных кривых намагничивания используемых магнитных материалов в форме зависимостей магнитной индукции от напряженности поля $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ в широком диапазоне изменения индукции. На начальном этапе нелинейные свойства сталей выбираются исходя из предыдущего опыта и предположений о свойствах материалов потенциальных поставщиков.

Особенности синтеза магнитных систем на базе пространственных вычислительных моделей прецизионных магнитных систем

На втором этапе применительно к магнитной системе циклотрона решалась задача синтеза, сводящаяся к определению такой формы и размеров элементов системы, при которой радиальная зависимость среднего по азимуту поля в медианной плоскости (горизонтальная черта

над выражением здесь и далее означает осреднение)

$$\overline{B(r)} = 1/2\pi \int_0^{2\pi} B_z(r, \varphi, 0) d\varphi$$

обеспечивает изохронность ускорения в выбранной рабочей точке циклотрона. Поскольку изохронное распределение магнитного поля в циклотронах имеет сложную пространственную конфигурацию, оно является результатом решения самосогласованной задачи расчета поля и динамики частиц.

Кроме того, во внимание обычно принимается ряд дополнительных условий — таких как [6,8,17,18]:

1) ограничение величины индукции в медианной плоскости в области „холмов“,

$$B < B_{\max} = 2T;$$

2) ограничение величины флаттера

$$F(r) = \frac{\overline{B(r)}^2}{[\overline{B(r)}^2 - 1]}$$

как функции радиуса r ,

$$F(r) > \frac{N^2 - 1}{N^2} K(r),$$

N — число элементов периодичности магнита,

$$K(r) = \frac{r}{\overline{B(r)}} \frac{d\overline{B(r)}}{dr};$$

3) ограничение величины первой и второй гармоник в области ускорения;

4) быстрое (за минимальное число оборотов) прохождение резонансных значений ν_z и ν_r ;

5) обеспечение достаточного пространства, в частности в центральной области, для размещения элементов ускоряющей системы и системы инжекции.

Сформулированная выше задача синтеза решалась в две стадии. На первой рассчитывались функции влияния варьируемых параметров на распределение среднего поля в медианной плоскости по радиусу. В качестве варьируемых параметров и зависимостей рассматривались:

- ток в основной обмотке возбуждения;
- форма боковых секторных накладок, описываемая сплайн-функцией, вид которой определялся несколькими параметрами; число параметров можно было пополнять в процессе поиска решения с целью синтеза формы поверхности, обеспечивающей заданную точность формирования требуемого распределения поля;
- форма поверхности центральной пробки со стороны медианной плоскости.

Исследовались также:

- влияние формы центрального шимма;
- влияние формы аксиальной (радиальной) фаски на внешнем радиусе сектора, наличие которой приводит к существенному улучшению характеристик поля:

подъему среднего уровня поля в рабочей области при той же величине тока, большему росту на внешних радиусах, более резкому спаду поля за радиусом вывода, уменьшению насыщения краев сектора на внешнем радиусе.

Функции влияния варьируемых параметров определялись как разность между двумя распределениями поля. Первое распределение рассчитывалось для оптимизируемого варианта магнитной системы с начальными значениями параметров. Второе распределение поля получалось в результате моделирования варианта магнитной системы, в котором соответствующий параметр был изменен на достаточно малую (но заметную, физически значимую) величину с целью выделения линейной составляющей функции влияния без потери точности расчетов. Для формирования поля с требуемой точностью потребовался учет:

— в электромагните циклотрона СС 18/9 — 19 функций влияния;

— в электромагните циклотрона СС 12 — 15 функций влияния;

— в электромагните циклотрона СС 30/15 — 17 функций влияния.

Следует отметить, что на первоначальном этапе число функций влияния было в 1.5–2 раза больше. Часть этих функций не использовалась в дальнейших расчетах исходя из конструктивных и технологических соображений.

На второй стадии с использованием полученного набора функций влияния решалась задача собственно синтеза магнитной системы циклотрона, которая сводилась к нахождению такого приращения варьируемых параметров (относительно их текущего значения), при котором распределение поля обеспечивало наилучшее приближение (в смысле среднего квадратического отклонения) к требуемому распределению. Поскольку функции влияния нелинейные, то расчетное распределение поля отличается от ожидаемого, и подобную процедуру (оценка приращений параметров и расчет поля при новых параметрах) необходимо повторять несколько раз для уточнения решения. Для формирования поля с требуемой точностью в циклотронах обычно требовались две–четыре итерации. Была достигнута точность совпадения расчетного распределения среднего поля с требуемым распределением на уровне нескольких гауссов для всех ускорителей в основной области ускорения частиц. В медианной плоскости радиальная зависимость среднего по азимуту поля в фиксированном наборе заданных точек может быть представлена в виде нелинейного оператора:

$$\vec{B}_{AVR} = \hat{B}_{AVR}(\mathbf{B}, r).$$

Таким образом, в операторной форме задача синтеза магнитной системы циклотрона может быть записана в следующем виде.

Шаг А: на k -й итерации решения самосогласованной задачи определяется изохронная зависимость \vec{B}_{AVR}^{req} как результат решения (с помощью соответствующего комплекса вычислительных программ, в данном случае,

например, [6,10,15,17]) задачи расчета динамики частиц по заданной пространственной карте магнитного поля, полученной на $(k - 1)$ -й итерации.

Шаг В: магнитостатическая задача формулируется с использованием векторного электрического \mathbf{P} и скалярного магнитного φ потенциалов [19–21]. Связь между искомой неизвестной φ и вектором напряженности магнитного поля \mathbf{H} выражается соотношением $\mathbf{H} = -\nabla\varphi + \mathbf{P}$, где вектор \mathbf{P} известен и удовлетворяет уравнению $\nabla \times \mathbf{P} = \mathbf{j}$, а для выражения связи между \mathbf{B} и \mathbf{H} используется соотношение $\mathbf{B} = \mu_0\mu\mathbf{H}$, μ — относительная магнитная проницаемость стали, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м.

Далее используется стандартный метод конечных элементов. Во всей расчетной области в каждом конечном элементе решение ищется в виде

$$\varphi^h = \sum_{i=1}^{NMESH} \varphi_i N_i,$$

где N_i — узловые функции формы [22], $NMESH$ — число узлов расчетной сетки.

В операторной форме эта задача может быть сформулирована как задача нахождения решения приближенного уравнения

$$(L_h \varphi^h - f^h, N_i) = 0, \quad i = \overline{1, NMESH}.$$

Здесь дифференциальный оператор L_h включает в себя граничные условия, в том числе и условия симметрии магнитной системы, локализующие расчетную область.

Решение системы нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных узловых значений потенциала $\vec{\varphi} = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{NMESH}\}^T$ позволяет определить вектор напряженности \mathbf{H} на каждом конечном элементе, согласно стандартной процедуре метода конечных элементов в виде совокупности значений $\vec{H} = \{\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_{NFE}\}$, где NFE — полное число конечных элементов.

Введем оператор \hat{H} следующим образом:

— в каждой точке пространства $\mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y, z)$, характеризующейся тремя декартовыми координатами x, y, z : определены векторы напряженности магнитного поля $\mathbf{H} = (H_x, H_y, H_z)$, которые вычисляются с учетом выбранной конечно-элементной аппроксимации исходной задачи, вычисленных узловых значений $\vec{\varphi} = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{NMESH}\}^T$ и заданной процедуры, описывающей распределение вектора \mathbf{P} ;

— для заданной совокупности точек $r = \{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_L\}$ определена совокупность векторов $\vec{H} = \{\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_L\}$.

Краткая форма записи оператора будет иметь следующий вид: $\vec{H} = \hat{H}(\vec{\varphi}, \mathbf{P}, r)$. Аналогичным образом можно ввести оператор: $\vec{B} = \hat{B}(\vec{\varphi}, \mathbf{P}, r)$.

Выбор формы границ раздела сред осуществляется в ходе решения задачи условной минимизации, причем значения \vec{B}_{AVR}^{calc} определяются в фиксированном заданном наборе точек:

$$\text{MIN} \left\| \vec{B}_{AVR}^{calc} - \vec{B}_{AVR}^{req} \right\|_{\text{all points}} \rightarrow 0,$$

$$(L_h \varphi^h - f^h, N_i) = 0, \quad i = \overline{1, \text{NMESH}},$$

$$\bar{H} = \hat{H}(\bar{\varphi}, \mathbf{P}, \bar{r}),$$

$$\bar{B} = \hat{B}(\bar{\varphi}, \mathbf{P}, \bar{r}),$$

$$F(r) = \bar{B}^2 / (\bar{B}^2 - 1),$$

$$F < F_{\max},$$

$$B < B_{\max}.$$

Здесь $\|\dots\|$ — норма разности векторов, а ограничения на распределение флаттера, магнитного поля и форму границ раздела сред диктуются не только техническими требованиями, но также технологическими и экономическими соображениями.

Аналізу подвергается максимально полная вычислительная модель, включающая все элементы магнитной системы, влияющие на формирование магнитного поля в рабочей области, в областях инжекции и экстракции пучка заряженных частиц.

Шаг С: анализ полученных результатов с позиций удовлетворения критериев проектирования магнитной системы. Рассчитанная на предыдущем шаге пространственная карта магнитного поля, учитывающая нелинейные эффекты насыщения ферромагнитных материалов и новую форму границ раздела сред, используется в качестве входных данных для $(k+1)$ -го шага решения самосогласованной задачи.

Результаты численного моделирования и синтеза магнитных систем представлены на рис. 5 для циклотрона СС 18/9 и на рис. 6 — для циклотрона СС 12.

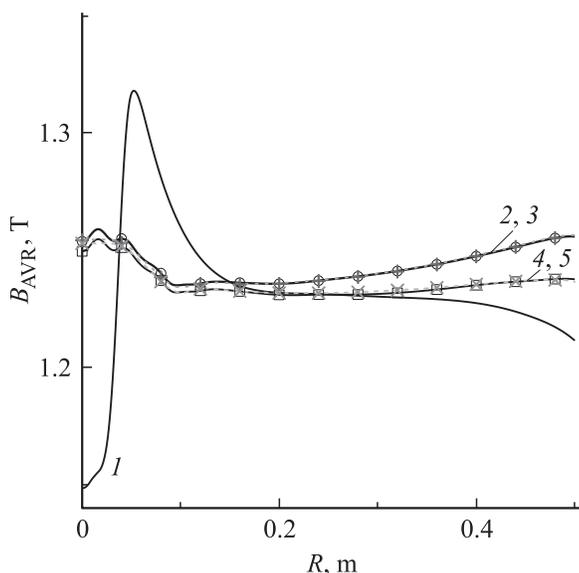


Рис. 5. Зависимость среднего поля от радиуса в циклотроне СС 18/9 для ускорения протонов и дейтронов. Пунктир — требуемые изохронные зависимости, сплошные кривые 1–5 — расчетные зависимости; + — требуемая изохронная зависимость для протонов, о — рассчитанная зависимость для протонов; × — требуемая изохронная зависимость для дейтронов, □ — рассчитанная зависимость для дейтронов.

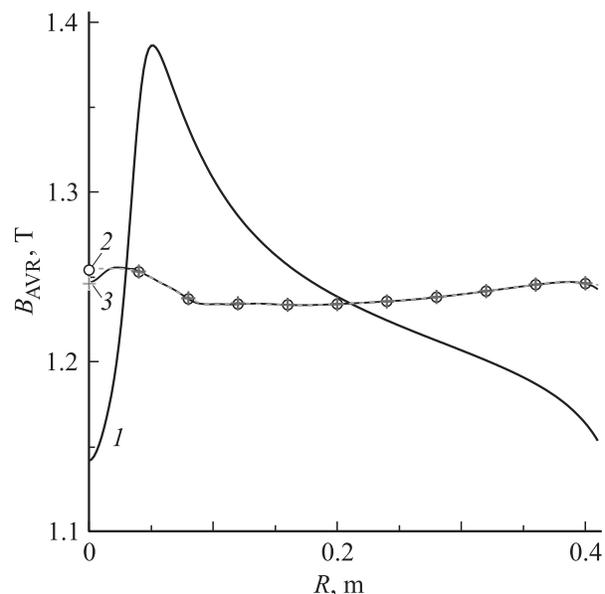


Рис. 6. Зависимость среднего поля от радиуса в циклотроне СС 12. Кривая 2 — требуемая изохронная зависимость, 1, 3 — расчетные зависимости. + — требуемая изохронная зависимость для протонов, о — рассчитанная зависимость для протонов.

Разработка магнитных систем, изготовление, сборка и наладка

Фактически достигнутая точность решения задачи зависит от ряда факторов как вычислительного, так и технологического характера.

Среди первых следует выделить степень детализации разбиения магнитной системы, определяющей аппроксимационные свойства разработанной модели, которая зависит от числа узлов расчетной сетки, ограниченного доступными вычислительными ресурсами. Обычно размер расчетной сетки $\sim 5 \cdot (10^5 - 10^6)$ узлов обеспечивал требуемую точность расчета поля в рабочей области примерно несколько гауссов.

Другим фактором является степень соответствия характеристик $\mu(\mathbf{H})$, заложенных в расчетную модель, реальным магнитным свойствам используемых материалов. Как правило, выполняются магнитные измерения, позволяющие описать нелинейные зависимости $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ сталей, из которых изготовлены детали конструкции магнитной системы [23].

На фактическое распределение поля также влияют ошибки изготовления и монтажа элементов конструкции магнитной системы циклотрона, которые трудно поддаются учету. Следует принимать во внимание и ошибки измерений на стадии наладки системы. По этим причинам размеры шиммов выбираются с припуском. Они корректируются по результатам магнитных измерений с использованием расчетных функций влияния.

Анализ функций влияния позволил также оценить допуски на точность изготовления и монтажа отдельных

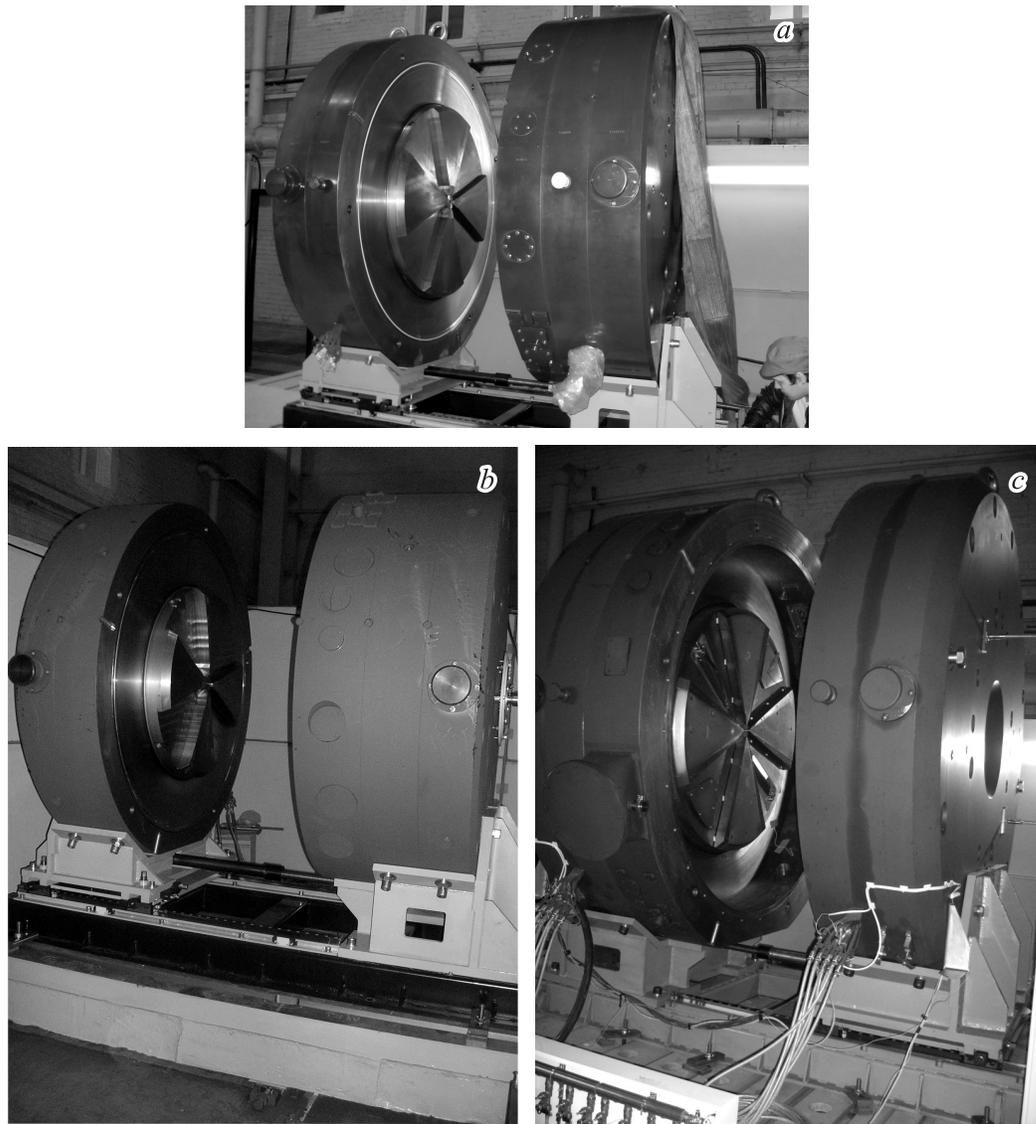


Рис. 7. Магнитная система циклотронов: *a* — СС 18/9, *b* — СС 12, *c* — МСС 30/15.

элементов магнитных систем циклотронов для обеспечения заданной точности формирования магнитного поля в рабочей области.

На основе полученных результатов была разработана рабочая документация и изготовлены магнитные системы циклотронов.

На рис. 7 приведены фотографии изготовленных электромагнитов циклотронов СС 18/9, СС 12 и МСС 30/15. В таблице приведены технические параметры этих электромагнитов.

После изготовления и сборки магнитной системы следовал третий этап — наладка системы. Расчеты позволили уточнить форму накладных шиммов. Результаты проведенных магнитных измерений были сопоставлены с данными численного моделирования для обоих распределений поля, соответствующих обоим режимам ускорения частиц (ионов H^- и D^-). Это позволило учесть неточность сборки магнитной системы.

Качество изготовления и сборки магнитных систем было таким, что предпринимать специальных мер по компенсации первой гармоники не было необходимости. После проведенных измерений с установленными секторными накладками, изготовленными с припуском, сопоставления данных расчетов и измерений, размеры шиммов корректировались согласно результатам численного моделирования. Окончательные измерения, сопоставление с расчетами и поверочный траекторный анализ показали, что поля магнитных систем сформированы с требуемой точностью.

На рис. 8 представлены результаты сопоставления измеренных и расчетных данных величины среднего поля в медианной плоскости циклотрона МСС 30/15. Следует подчеркнуть, что подвижные шиммы, изготовленные без припуска, обеспечивают необходимую перестройку распределения магнитного поля. Последнее обстоятельство подтверждает требуемую точность численных расчетов.

Технические параметры электромагнитов циклотронов СС 18/9, СС 12, МСС 30/15

Характеристика	Электромагнит циклотрона		
	СС-12	СС-18/9	МСС-30/15
Тип электромагнита	Броневой, цилиндрический		
Высота электромагнита, mm	1030	1050	1350
Наружный диаметр, mm	1620	2000	2500
Диаметр полусного наконечника, mm	900	1150	1400
Количество холмов	4	4	4
Угловая протяженность холма (сектора), deg	46	46.8	47
Воздушный зазор, mm			
по холмам	27	27	30
в долинах	130	118	150
Индукция магнитного поля, T		(H ⁻ /D ⁻)	(H ⁻ /D ⁻)
по холмам (max)	1.9	1.93/1.90	1.98/1.98
в долинах	0.475	0.5/0.5	0.57/0.57
Номинальный ток возбуждения, A	95 ± 5	80 ± 5	115 ± 5
Номинальное падение напряжения, V	85	88	95
Масса активной стали, kg	12 660	20 200	37 900
Масса активной меди обмотки, kg	1070	1210	2600
Масса электромагнита с основанием, kg	16 200	22 000	44 100
Габаритные размеры электромагнита с основанием (ширина/длина/высота), mm	2100×2500×2045	2500×2500×2380	2900×2800×2800
Режим работы		Продолжительный	

Таким образом, при условии выполнения допусков на точность изготовления и монтажа элементов магнитной системы предложенный подход позволяет решить задачу

формирования магнитной системы циклотрона на основе результатов численного моделирования.

Заключение

На базе представленных в настоящей работе электромагнитов созданы циклотроны СС 18/9, СС 12, МСС 30/15.

В настоящее время два циклотрона СС 18/9 находятся в эксплуатации, один из них в АБО Академии г. Турку (Финляндия), второй — в Центральном рентгенорадиологическом институте п. Песочный (Санкт-Петербург, Россия). Циклотрон МСС 30/15 сдан в эксплуатацию в ноябре 2009 г. в университете г. Ювяскюля (Финляндия). На этих циклотронах получены технические параметры, регламентированные проектами. Циклотрон СС 12 (заказчик — фирма „Позитом“, Москва, Россия) изготовлен, в июле 2009 г. завершена наладка всех систем. В настоящее время он находится на хранении в ФГУП „НИИЭФА им. Д.В. Ефремова“ в связи с отсутствием помещения у Заказчика.

Подтверждена на практике предложенная концепция формирования магнитной системы циклотронов.

Создание подвижных магнитных шиммов оказалось эффективным техническим решением, обеспечивающим перестройку поля при ускорении, по крайней мере, двух типов частиц.

Сравнительный анализ результатов магнитных измерений и численного моделирования подтвердил вывод о том, что этап создания физической (натурной) модели при проектировании такого электрофизического устройства, как циклотрон, может быть заменен компьютерным

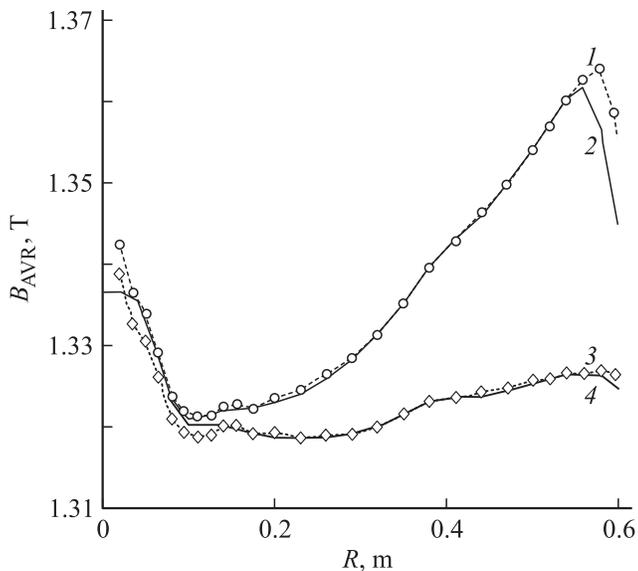


Рис. 8. Сопоставление измеренных и расчетных данных среднего магнитного поля в зависимости от радиуса для циклотрона МСС 30/15. Кривые 1, 2 соответствуют протонной зависимости, кривые 3, 4 — дейтонной зависимости; \circ и \square — средние измеренные значения поля; сплошные кривые соответствуют изохронным зависимостям, полученным расчетным путем на основе результатов пространственных распределений магнитного поля: 1 — измеренное поле для протонов, 2 — изохронное поле для протонов, 3 — измеренное поле для дейтронов, 4 — изохронное поле для дейтронов.

моделированием, что значительно сокращает финансовые и временные затраты при разработке полномасштабной машины.

Авторы признательны заместителю генерального директора ФГУП „НИИЭФА им. Д.В. Ефремова“ — директору НПК „ЛУЦ“ М.Ф. Ворогушину за внимание к работе; заместителю генерального директора ФГУП „НИИЭФА им. Д.В. Ефремова“ — директору НТЦ „СИНТЕЗ“ В.А. Белякову за поддержку работ по созданию методов синтеза прецизионных магнитных систем; начальнику отдела НПК „ЛУЦ“ А.П. Строкачу за участие в обсуждении результатов расчетов и конструкции. Авторы благодарны проф. И.А. Шукейло за плодотворные и полезные дискуссии; ведущему программисту НТЦ „СИНТЕЗ“ Т.Ф. Беляковой за действенную помощь в проведении расчетов магнитного поля на всех этапах работ; с.н.с. НПК „ЛУЦ“ А.В. Галчуку за предоставление результатов выполненного им траекторного анализа для циклотронов СС 12, МСС 30/15, обсуждения и дискуссии; инженеру-конструктору НТЦ „СИНТЕЗ“ М.С. Ларионову и начальнику лаборатории НТЦ „СИНТЕЗ“ А.А. Фирсову за предоставление результатов выполненных ими измерений основных критических намагничивания стале́й.

Список литературы

- [1] *Ivanenko I.A.* // Lectures of PNPI School Accelerator Physics and Techniques. St.Petersburg, Repino, February 15–19, 2006.
- [2] *Vorojzov S.B., Vorozhtsov A.S., Neskovich N.* et al. // *Nukleonika*. 2003. Vol. 48. N 4. P. S39–S44.
- [3] *Ворогушин М.Ф.* // Сб. докл. 11-го Междунар. совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине (ICAA'05). СПб., 2005. С. 237–239.
- [4] *Акулова Н.В., Богданов П.В., Малышев И.Ф., Моисеев В.Я., Мошкин В.Н., Мясников Ю.А., Пыряев В.П., Соламес А.А., Суворов М.М.* Конструктивные особенности циклотрона для производства радионуклидов. Препринт НИИЭФА П–А–Б–0436. Л.: НИИЭФА, 1978.
- [5] *Ворожцов С.Б.* Численное моделирование магнитной системы и динамики частиц в ускорителях с пространственной вариацией магнитного поля. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Дубна, 1986.
- [6] *Гикал Б.Н., Гульбекян Г.Г., Борисов О.Н., Ломовцев А.М., Зарубин В.Б., Иваненко И.А., Казаринов Н.Ю., Казаха В.И., Кухтин В.П., Ламзин Е.В., Мельников В.Н., Пащенко С.В., Самсонов Е.В., Семченкова О.В., Сычевский С.Е., Франко Й.* Формирование магнитного поля циклотрона ДЦ-60. Препринт ОИЯИ Р9–2006–151. Дубна: ОИЯИ, 2006.
- [7] *Gilbekian G.G.* et al. // *Nukleonika*. 2003. Vol. 4. N 48. P. 207.
- [8] *Белякова Т.Ф., Богданов П.В., Васильев В.Л., Ворогушин М.Ф., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Попов А.В., Сидоров А.В., Стогов Ю.И., Строкач А.П., Сычевский С.Е.* // Сб. докл. 11-го Междунар. совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине (ICAA'05). СПб., 2005. С. 240–242.
- [9] *Kukhtin V., Lamzin E., Sytchevsky S.* // XXXIV Europ. Cyclotron Progress Meeting (ECMP 2005). Belgrade, Serbia and Montenegro, 2005. P. 37.
- [10] *Гульбекян Г.Г., Франко Й.* Алгоритм синтеза и анализа характеристик магнитных структур изохронных циклотронов с цилиндрическими полосо́ми. Препринт ОИЯИ Р9–92–129. Дубна, 1992. 16 с.
- [11] *Ivanenko I., Gulbekian G., Franko J., Semchenkov A.* // Proc. 8th Europ. Particle Accel. Conf. Paris, 2002. P. 2349–2351.
- [12] *Belov A.V., Belyakova T.F., Gornikel I.V., Kuchinsky V.G., Kukhtin V.P., Lamzin E.A., Semchenkov A.G., Shatil N.A., Sytchevsky S.E.* // IEEE Transact. on Appl. Superconduct. 20th Int. on Magnetic Technology. 2008. Vol. 18. N 2. P. 1609–1612.
- [13] *Program package for 3D simulation of stationary magnetic fields, analysis and synthesis of magnet system for electrophysical devices (КОМПОТ/М1.0).* Registration Certificate # 2003612492 of Nov. 12, 2003. Computer program register. Moscow.
- [14] *Белов А.В., Беляков В.А., Белякова Т.Ф., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Сычевский С.Е., Филатов О.Г.* // Сб. докл. 11-го Междунар. совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине (ICAA'05). СПб., 2005. С. 211–214.
- [15] *Белякова Т.Ф., Богданов П.В., Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Гальчук А.В., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Попов А.В., Сидоров А.В., Строкач А.П., Сычевский С.Е.* // Там же. С. 246–248.
- [16] *Алексеев А.В., Беляков В.А., Белякова Т.Ф., Гикал Б.Н., Гульбекян Г.Г., Иваненко И.А., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Малков А.А., Скорняков Ф.И., Сычевский С.Е.* // Там же. С. 219–223.
- [17] *Белов В.П., Богданов П.В., Васильченко И.Н., Ворогушин М.Ф., Григоренко С.В., Зуев Ю.В., Кислов В.А., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Мудролобов В.Г., Никифоровский А.В., Попов А.В., Севергин Ю.П., Силаев С.А., Стогов Ю.И., Строкач А.П., Сычевский С.Е., Шилкин Н.Ф.* // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Электрофизическая аппаратура. 2006. Т. 30. № 4. С. 27–29.
- [18] *Богданов П.В., Будтов А.А., Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Гальчук А.В., Григоренко С.В., Давыдов В.Н., Кислов В.А., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Меньшов Д.Ю., Мудролобов В.Г., Понаморенко В.И., Попов А.В., Сидоров А.В., Силаев С.А., Строкач А.П., Сычевский С.Е.* // Сб. докл. 11-го Междунар. совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине (ICAA'05). СПб., 2005. С. 249–252.
- [19] *Френкель Я.И.* Собрание избранных трудов. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1956. Т. 1 (Электродинамика). 370 с.
- [20] *Грешняков В.М.* // Электричество. 1960. № 8. С. 33–35.
- [21] *Dojnikov N., Lamzin E., Sytchevsky S.* // IEEE Transact. on Magnetics. 1992. Vol. 28. N 4. P. 908–911.
- [22] *Стренг Г., Фикс Дж.* Теория метода конечных элементов. М.: Мир, 1977.
- [23] *Белякова Т.Ф., Гикал Б.Н., Гульбекян Г.Г., Иваненко И.А., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Ларионов М.С., Максимов Б.Л., Сычевский С.Е.* // Сб. докл. 11-го Междунар. совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине (ICAA'05). СПб., 2005. С. 224–227.