

## Особенности создания магнитной системы циклотрона МСС 30/15 и формирования поля с использованием поворотных шиммов

© П.В. Богданов,<sup>1</sup> Р. Heikkinen,<sup>2</sup> М.Ф. Ворогушин,<sup>1</sup> В.П. Кухтин,<sup>1</sup> Е.А. Ламзин,<sup>1</sup>  
Ю.И. Стогов,<sup>1</sup> А.П. Строкач,<sup>1</sup> С.Е. Сычевский,<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова,  
196641 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: sytch@niiefa.sintez.spb.su

<sup>2</sup> Университет г. Ювяскюля, Отделение физики,  
Ювяскюля, Финляндия

e-mail: pauli.heikkinen@juu.fi

(Поступило в Редакцию 25 марта 2010 г.)

Для ускорения ионов, имеющих различные отношения заряда к массе, требуется формирование изохронных зависимостей магнитного поля, различающихся как средним уровнем, так и его пространственным распределением. Описан подход к формированию поля в изохронных циклотронах, базирующийся на использовании магнитных шиммов. Представлены расчетные и экспериментальные результаты формирования поля для ускорения двух типов частиц — отрицательных ионов водорода и дейтерия в медицинском циклотроне МСС 30/15. Циклотрон разработан и изготовлен в период с 2007 по 2009 г. в НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (Санкт-Петербург, Россия) и поставлен в университет г. Ювяскюля (Финляндия).

### Введение

Циклотрон СС 30/15 предназначен для получения широкого круга медицинских изотопов, используемых не только для однофотонной (гамма-томографы) и позитронной (позитронно-эмиссионные томографы) диагностики, но и для радиотерапии злокачественных опухолей [1,2]. Циклотрон рассчитан на ускорение пучков отрицательных ионов водорода ( $H^-$ ) до энергии 30 MeV или пучков отрицательных ионов дейтерия ( $D^-$ ) до 15 MeV при величине тока пучка 100 и 50  $\mu A$  со-

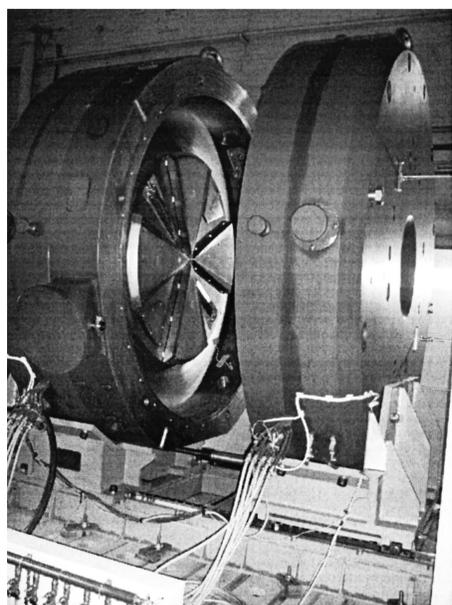


Рис. 1. Магнитная система циклотрона МСС 30/15.

ответственно. Использование обдирочных устройств с перемещаемыми графитовыми фольгами позволяет получить пучки протонов и дейтронов с варьированием энергии в диапазонах от 18 до 30 и от 9 до 15 MeV соответственно.

Магнитная система циклотрона состоит из четырехсекторного электромагнита броневое типа с вертикально расположенной медианной плоскостью (рис. 1). Электромагнит составляют два полуярма, содержащие полюсы, полюсные наконечники и катушки. Стойка магнитопровода, выполненная в виде толстостенного кольца из углеродистой стали, состоит из трех частей, средняя часть стойки выполняет роль корпуса вакуумной камеры. Одно полуярмо может при необходимости отодвигаться от корпуса камеры на расстояние до 800 mm по направляющим. Корпус вакуумной камеры прикреплен к неподвижному полуярму. Такое техническое решение обеспечивает простой доступ к устройствам внутри вакуумной камеры. Для формирования изохронного магнитного поля при ускорении протонов или дейтронов используются подвижные магнитные шиммы.

### Анализ существующих подходов к созданию магнитных систем циклотронов

Магнитное поле в изохронных циклотронах имеет сложную пространственную конфигурацию, при этом относительная погрешность формирования изохронной зависимости распределения поля составляет  $10^{-3}$ – $10^{-4}$ . Такие жесткие требования определяются динамикой движения частиц в циклотроне в процессе ускорения. По этой причине выбор магнитной структуры является

одной из важнейших задач, решение которой определяет дальнейшие потребительские и эксплуатационные свойства ускорителя.

В современных циклотронах прикладного назначения формирование изохронного магнитного поля (при ускорении ионов с различным отношением заряда к массе) осуществляется либо с помощью токонесущих корректирующих катушек, либо с помощью магнитных шиммов.

Выбирая расположение, форму и величину токов корректирующих катушек, можно получить требуемое изохронное распределение поля для каждого типа ускоряемых ионов [2]. Катушки для повышения эффективности располагают как можно ближе к медианной плоскости и, как правило, размещают внутри вакуумного объема ускорительной камеры. В силу того что катушки запекаются эпоксидным компаундом, затруднено получение рабочего вакуума, требующегося для ускорения пучка. Для уменьшения отрицательного эффекта катушки помещают в герметичные контейнеры соответствующей формы. Недостатками системы с корректирующими катушками являются также необходимость использования дополнительных отдельных источников питания для каждой корректирующей катушки, конструктивная и технологическая сложность изготовления катушек заданной, часто достаточно сложной, формы. Поэтому когда число различных типов ионов невелико и перестройка режимов ускорения осуществляется неоперативно (относительно нечасто), целесообразно использовать шиммирование.

Магнитные шиммы представляют собой детали различной конфигурации, выполненные с высокой точностью из магнитного материала (чаще всего — магнитной стали). Их располагают и ориентируют по отношению к электромагниту циклотрона различным образом, но так, чтобы своим влиянием совместно с основным магнитом циклотрона обеспечить требуемое распределение поля в рабочей области. Распределение поля определяется совокупным влиянием всех магнитных элементов системы, поэтому форма и положение магнитных шиммов чаще всего находят расчетным путем. Например, в работах [3,4] предложен способ шиммирования, основанный на изменении геометрической формы границ раздела сред в магнитной структуре с помощью подвижных металлических стержней, вводимых в отверстия в полюсах и перемещаемых по высоте, что позволяет изменять как уровень поля, так и характер его распределения. Недостатком данного способа является необходимость использования большого количества стержней для задания изохронной зависимости. Этот способ допустимо использовать там, где структуры, формирующие поле, располагаются вне вакуумного объема.

Указанных недостатков удалось избежать при формировании различных изохронных зависимостей с использованием набора подвижных магнитных шиммов [5]. Шестнадцать магнитных шиммов расположены внутри специальных полостей, выполненных в восьми холмах, которые формируют изохронное поле магнита циклотрона. Каждый шимм был выполнен в виде детали, форма

которой была определена в результате математического моделирования. Изменение распределения поля обеспечивалось за счет радиального смещения восьми шиммов и аксиального (перпендикулярного медианной плоскости основного магнита) смещения других восьми шиммов. Перестройка режима ускорения (например, переход от режима ускорения отрицательных ионов водорода  $H^-$  к режиму ускорения отрицательных ионов дейтерия  $D^-$ ) сводится к одновременному перемещению всех шестнадцати шиммов во всех четырех парах секторов. Недостатком способа является сложная структура магнитных шиммов и системы приводов; помимо этого возникает необходимость точной обработки большого количества деталей, образующих подвижные шиммы. При формировании поля магнита возникает необходимость доработки шиммов, и для извлечения любого из шиммов требуется отсоединить полюсный наконечник от полюса, т.е. практически разобрать значительную часть всего магнита. Эта операция является весьма трудоемкой, причем может возникнуть потребность повторить цикл „разборка–сборка“ несколько раз.

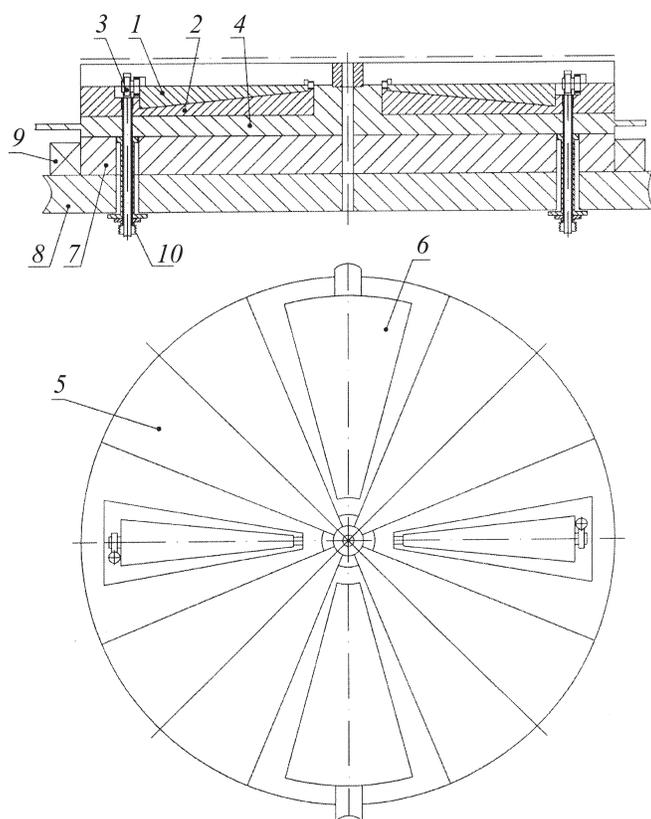
Более простой представляется конструкция для формирования изохронной зависимости при поступательно-вращательном перемещении магнитных шиммов, выполненных в виде подвижных ребер, установленных в долинах полюсных наконечников электромагнита [6]. Для перестройки поля шимм одним концом закреплен на оси, которая, в свою очередь, установлена на центральной пробке электромагнита циклотрона. Поступательное перемещение второго конца шимма (за счет использования привода) обеспечивает возможность приближения или удаления магнитных масс шимма относительно медианной плоскости, что в свою очередь приводит к перераспределению поля и изменению его среднего уровня. Это обеспечивает перестройку изохронных зависимостей поля для ускорения  $H^-$  и  $D^-$ . Недостатком такого подхода является то, что оси вращения всех шиммов устанавливаются в районе центральной пробки электромагнита. Поскольку сами оси и элементы их крепления занимают определенную часть объема в зоне, где наличие ферромагнитных масс существенно влияет на уровень среднего магнитного поля, они должны изготавливаться и устанавливаться с очень высокой точностью. Кроме того, формирование различных изохронных зависимостей для  $H^-$  и  $D^-$  осуществляется только за счет перемещения детали неизменной формы в зазоре основного магнита, поскольку геометрическая форма шимма, отделенного от магнитопровода, остается неизменной, а изменяется только его положение.

### **Конструктивное решение магнитной системы циклотрона МСС 30/15 с использованием поворотных шиммов**

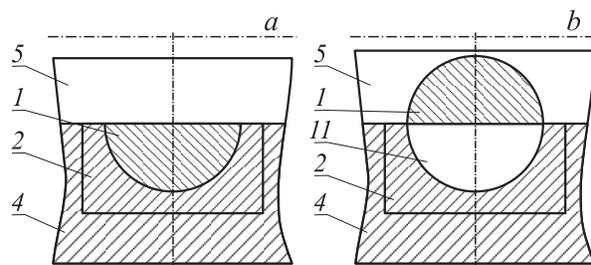
Чтобы удовлетворить требованиям технологичности, простоты изготовления и настройки магнитной системы,

модульности структуры и, в конечном итоге — минимизации стоимости изготовления и эксплуатации, в циклотроне МСС 30/15 реализован новый способ магнитного шиммирования.

Подвижные шиммы электромагнита (рис. 2) выполнены поворотными и установлены в специальные вкладыши. Сами вкладыши помещены в свободных от дуантов долинах. Ось вращения каждого поворотного шимма компланарна медианной плоскости и направлена к центру полюса электромагнита. Поворот шиммов без нарушения вакуума в камере обеспечивается реечным приводом с герметизированным при помощи сильфона подвижным штоком. В полюсных наконечниках в долинах электромагнита сделаны углубления простой конфигурации, в которые помещены вкладыши с выполненными в них желобами (выемками). Они располагаются симметрично относительно медианной плоскости электромагнита. Желобам придается форма шимма, зависящая в общем случае от количества типов ускоряемых частиц. В каждом желобе установлен магнитный шимм, который может поворачиваться вокруг оси. В режиме ускорения наиболее тяжелых частиц шимм находится



**Рис. 2.** Схематическое изображение поворотных шиммов, установленных в желобах в долинах электромагнита изохронного циклотрона МСС 30/15: 1 — поворотный шимм, 2 — вкладыш, 3 — приводной шток-рейка, 4 — полюсный наконечник, 5 — сектор, 6 — дуант, 7 — полюс, 8 — балка электромагнита, 9 — катушка, 10 — сильфон. Медианная плоскость электромагнита показана пунктиром.



**Рис. 3.** Расположение поворотных шиммов для режима ускорения: *a* —  $D^-$ . Шимм 1 находится внутри желоба, 2 — вкладыш, 4 — полюсный наконечник, 5 — сектор. Медианная плоскость электромагнита показана пунктиром; *b* — более легких частиц  $H^-$ . Шимм 1 повернут на угол  $180^\circ$  вокруг оси, выведен из желоба 11 и приближен к медианной плоскости (пунктир), 2 — вкладыш, 4 — полюсный наконечник, 5 — сектор.

в желобе, при этом распределение магнитного поля формируется поверхностями полюсных наконечников электромагнита. Эти поверхности обеспечивают изохронную зависимость для соответствующей ускоряемой частицы. Шимм в формировании поля фактически не участвует, поскольку по сути составляет единое целое с полюсным наконечником (рис. 3, *a*). При переходе к режиму ускорения более легкой частицы каждый шимм поворачивается вокруг своей оси на заданный угол, выводится из желоба и приближается к медианной плоскости (рис. 3, *b*). Это приводит к приближению магнитных масс к медианной плоскости, перераспределению магнитного поля и увеличению среднего уровня поля.

Преимущество такого технического решения заключается в том, что используется минимальное количество подвижных шиммов и соответственно приводов, а положение осей подвижных шиммов вблизи центральной области не ограничивает возможности формирования нескольких изохронных зависимостей [7].

### Численное решение задачи оптимизации магнитной системы

Геометрическая форма шиммов определялась в результате численного моделирования и оптимизации магнитной системы циклотрона с использованием разработанного авторами нового комплекса программ COMROTE/MP [8,9]. Этот комплекс программ является существенным развитием подхода, реализованного ранее в виде комплекса программ КОМРОТ [10].

Вычислительная технология базируется на использовании прецизионных трехмерных магнитостатических моделей магнитных систем.

Комплекс вычислительных программ COMROTE/MP обеспечивает расчет распределений магнитных полей, вызванных физически значимыми вариациями геомет-

рических параметров магнитных систем и величин токов в обмотках циклотрона. На основе найденных карт магнитного поля рассчитываются функции влияния отдельных элементов конструкции и катушек. Такой подход позволяет сформулировать вариационную задачу синтеза нелинейной магнитной системы циклотрона по заданному распределению поля. Дополнительные условия, вызванные техническими, технологическими и экономическими ограничениями, также учитываются на этапе синтеза.

Учитываются эффекты, связанные с наличием нескольких типов электротехнических и конструктивных сталей с различными нелинейными характеристиками, отвечающими реальным магнитным свойствам материалов в полном диапазоне изменения значений индукции.

Найденные в результате численного моделирования распределения поля, пондеромоторных сил и т.п., а также интегральные характеристики магнитной системы и их вариации используются в последующем анализе. В случае необходимости при расчете распределения поля учитываются результаты моделирования деформации элементов магнитной системы.

Требуемая изохронная зависимость поля является результатом решения самосогласованной задачи расчета поля и динамики частиц. Входными данными для оптимизации магнитной системы циклотрона являются результаты траекторного анализа. В свою очередь, полученные пространственные распределения поля трансформируются во входные файлы (в виде детальной карты магнитного поля) для программ расчета динамики частиц. Таким образом, алгоритм позволяет замкнуть цикл решения совместной с траекторным анализом нелинейной задачи оптимизации магнитной системы в процессе проектирования циклотронов.

Сопоставление результатов магнитных измерений и расчетов показывает, что данная вычислительная технология позволяет обеспечить формирование изохронной зависимости поля в циклотронах с локальной погрешностью, характеризующейся величиной  $10^{-3}$ .

Используя предыдущий опыт, на начальном этапе расчетов (соответствующем этапам технического и рабочего проектирования) для описания свойств электротехнических сталей были приняты близкие к реальным нелинейные зависимости основных кривых намагничивания. Степень неопределенности, обусловленная неточным знанием магнитных свойств сталей, учтена путем задания припуска на форму боковых секторных накладок (секторных накладных шиммов).

После предоставления образцов сталей эти нелинейные зависимости были уточнены с использованием результатов измерений магнитных свойств материалов [11], что позволило уточнить расчетным путем форму накладок.

Припуск также необходим для учета возможных неточностей изготовления и сборки магнитной системы. В случае необходимости для компенсации ошибок такого рода на этапе наладки электромагнита может

быть решена дополнительная задача доводки магнитной системы с целью окончательного формирования требуемого распределения поля. Решение этой задачи базируется на численном моделировании электромагнитной системы с использованием функций влияния отдельных элементов, причем во внимание принимаются данные магнитных измерений.

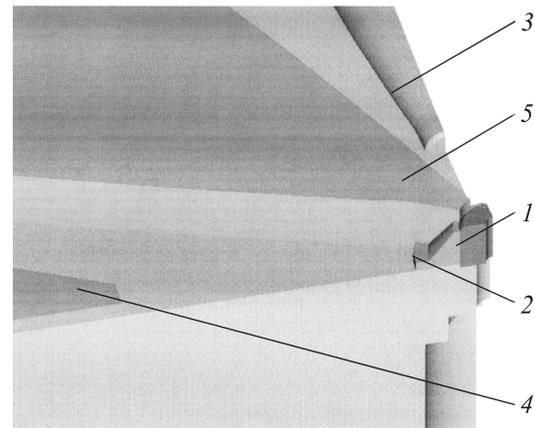
Форма накладок уточняется после проведения измерений на стадии наладки и настройки магнитной системы.

В ходе выбора и оптимизации магнитной системы циклотрона вариации подвергались следующие параметры:

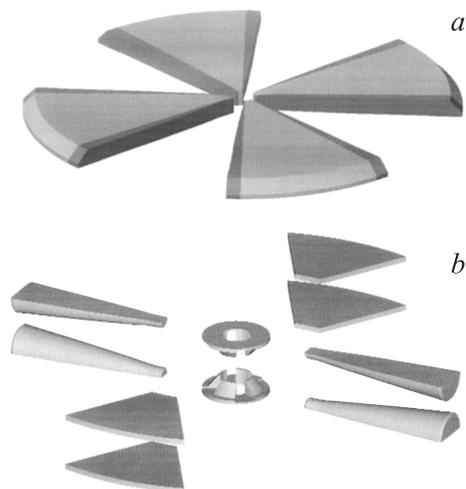
- размеры и поперечное сечение магнитопровода;
- ток в катушках возбуждения;
- геометрическая форма и размеры элементов центральной области: центральной пробки, центрального шимма и аксиальной подрезки носика сектора со стороны медианной плоскости;
- размеры фаски сектора на внешнем радиусе, азимутальный профиль боковых секторных накладных шиммов (накладок);
- позиции и форма поверхности подвижных (поворотных) шиммов, включая принципы их работы;
- геометрическая форма и размеры дополнительных неподвижных шиммов, предназначенных для минимизации второй гармоники поля и установленных в долинах, свободных от подвижных шиммов.

На рис. 4 показано взаимное расположение основных элементов магнитной системы, выбор которых обеспечивает требуемые изохронные зависимости. На рис. 5, *a* показаны секторы с боковыми накладками и фаской на внешнем радиусе. На рис. 5, *b* показана система шиммов магнита циклотрона МСС 30/15.

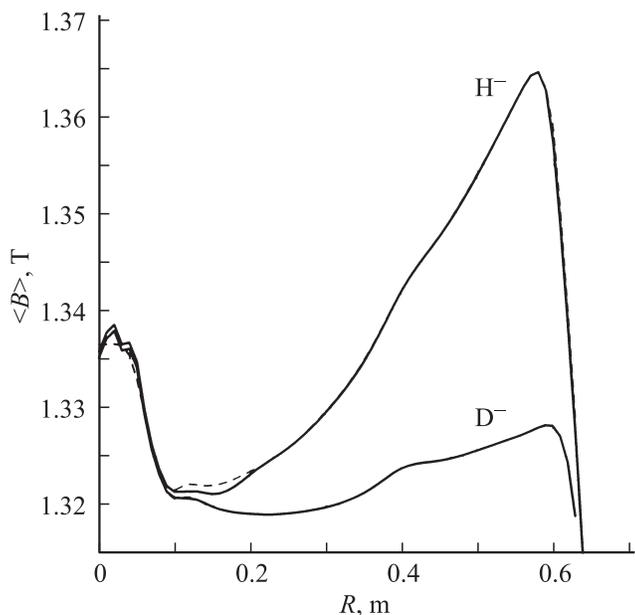
На рис. 6 представлены расчетные и требуемые распределения среднего по азимуту поля в медианной плоскости магнита.



**Рис. 4.** Центральная область магнитной системы циклотрона МСС 30/15 (фотореалистическое изображение 1/4 части модели): 1 — центральная пробка; 2 — центральный шимм; 3 — поворотный шимм; 4 — неподвижный долинный шимм; 5 — сектор (полюсный наконечник).



**Рис. 5.** *a* — система боковых накладок и фасок на внешних радиусах для секторов магнита циклотрона (фотоизображение модели); *b* — система шиммов магнита циклотрона (фотоизображение модели).



**Рис. 6.** Распределение среднего поля для обоих положений поворотных шиммов в сопоставлении с соответствующими требуемыми изохронными зависимостями (показаны пунктиром). Верхние кривые соответствуют режиму ускорения  $H^-$ , нижние — режиму ускорения  $D^-$ .

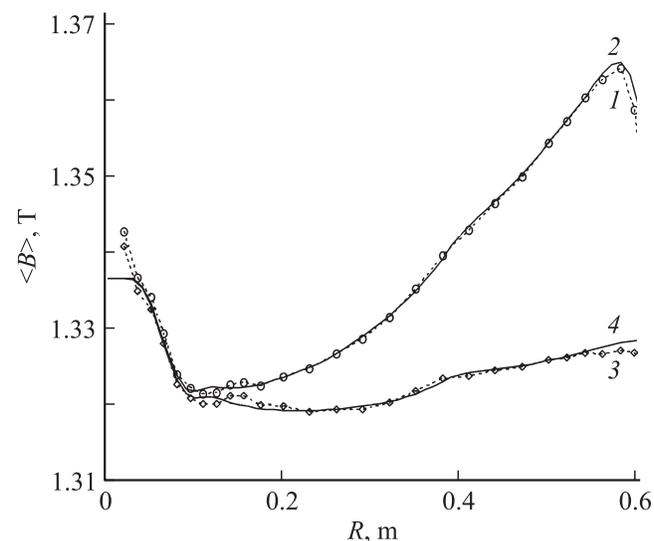
Решение задачи оптимизации позволило выбрать параметры магнитной системы, обеспечивающие режимы ускорения  $H^-$  и  $D^-$ .

Анализ функций влияния позволил также оценить допуски на изготовление и монтаж элементов магнита. На основе расчетных данных была разработана рабочая документация и изготовлена магнитная система циклотрона.

### Сопоставление результатов математического моделирования и данных измерений

К этапу изготовления магнитной системы были подготовлены образцы сталей и выполнены магнитные измерения их свойств (методика измерений основной кривой намагничивания в широком диапазоне изменения индукции и используемая аппаратура описаны в работе [11]). Расчеты позволили уточнить форму секторных накладных шиммов. Были рассчитаны пространственные распределения поля для двух типов системы с шиммами — выполненными как с припусками, так и без них. Сопоставление результатов магнитных измерений и данных численного моделирования позволило учесть неточности изготовления и сборки конкретной магнитной системы путем расчетного уточнения формы боковых секторных накладных шиммов, а также показать, что предпринимать специальные меры по компенсации первой гармоники не требуется. При этом следует особо подчеркнуть, что форма поверхности поворотных шиммов была выбрана расчетным путем на стадии проектирования и не изменялась после изготовления. После окончательной обработки и установки боковых секторных шиммов перестройка магнитного поля от режима ускорения одного типа частиц к режиму ускорения другого типа частиц осуществляется только за счет перемещения поворотных шиммов.

Окончательные измерения в сопоставлении с расчетами показали, что поле магнитной системы в основной области ускорения сформировано для обоих типов ча-



**Рис. 7.** Сопоставление измеренных и расчетных данных среднего магнитного поля в зависимости от радиуса для циклотрона МСС 30/15. Кривые 1,2 соответствуют протонной зависимости; 3,4 — дейтонной зависимости. Кружками и ромбами показаны средние измеренные значения поля, сплошные линии соответствуют результатам расчетов пространственных распределений магнитного поля.

стиц с точностью  $(2-10) \cdot 10^{-4}$  Т при среднем уровне поля в рабочей области 1.3 Т (рис. 7).

В ходе наладки циклотрона в университете г. Ювяскюля в процессе тестов на пучках было получено, что максимальные значения пучков составляют для протонов 200  $\mu$ А и для дейтронов — 62  $\mu$ А.

## Заключение

Подтверждена на практике предложенная концепция формирования магнитной системы циклотронов с использованием поворотных шиммов, которые являются эффективным техническим решением, обеспечивающим оперативную перестройку поля при переходе от ускорения одного типа частиц к другому типу.

На основе предложенного подхода создан электромагнит циклотрона МСС 30/15 для ускорения двух типов частиц.

Циклотрон МСС 30/15 в ноябре 2009 г. прошел приемосдаточные испытания в университете г. Ювяскюля (Финляндия), получены технические параметры, регламентированные проектом.

Представленный в работе подход позволил отказаться от изготовления различных типов масштабируемых „натурных“ моделей, привел к сокращению времени и стоимости работ на всех основных этапах разработки, изготовления и наладки магнитной системы, обеспечил возможность контролировать и повышать качество изделия.

Авторы признательны 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. Авторы признательны с.н.с. НПК „ЛУЦ“ А.В. Галчуку за предоставление результатов выполненного им траекторного анализа для циклотрона МСС 30/15, обсуждение и дискуссии. Авторы признательны ведущему программисту НТЦ „СИНТЕЗ“ Т.Ф. Беляковой за действенную помощь в проведении расчетов магнитного поля на всех этапах работ. Авторы признательны инженеру-конструктору НТЦ „СИНТЕЗ“ М.С. Ларионову и начальнику лаборатории НТЦ „СИНТЕЗ“ А.А. Фирсову за предоставление результатов выполненных ими измерений основных критических намагничивания сталеи.

## Список литературы

- [1] Heikkinen P. // Europ. Cyclotron Progress Meeting (ECPM XXXVII, Groningen, The Netherlands). 2009. P. 37.
- [2] Гикал Б.Н., Гульбекян Г.Г., Борисов О.Н., Ломовцев А.М., Зарубин В.Б., Иваненко И.А., Казаринов Н.Ю., Казака 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, ОИЯИ, Дубна, 2006.
- [3] Патент Канады 1.008.125 класс МКП. Method and apparatus for magnetic field shimming in an isochronous cyclotron. С. В. Bigham, Atomic Energy of Canada, Ltd. Приоритет от 07.03.1975.
- [4] Bigham C.B. // Nuclear Instruments and Methods. 1975. Vol. 131. P. 223–228.
- [5] 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 К.А., Мудролюбков 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.
- [6] Conard E., Abs M., Dom C. // Proc. 2<sup>th</sup> Europ. Part. Accel. Conf. Nice. 1990. Vol. 1. P. 410–421.
- [7] Пат. РФ № 2373873 H05H 13/00 (2006.01). Изохронный циклотрон для ускорения нескольких типов заряженных частиц / П.В. Богданов, М.Ф. Ворогушин, В.П. Кухтин, Е.А. Ламзин, А.П. Строкач, С.Е. Сычевский. Опубл. 20.10.2009. БИ № 32.
- [8] Амосков В.М., Белов А.В., Беляков В.А., Белякова Т.Ф., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Сычевский С.Е. // Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем. 2009. Т. 67. № 2. С. 402.
- [9] Белов А.В., Беляков В.А., Белякова Т.Ф., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Сычевский С.Е., Филатов О.Г. // Сб. докл. 11<sup>го</sup> Междунар. совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине (ICAA'05). СПб., 2005. С. 211–214.
- [10] Doinikov N.I., Lamzin E.A., Sytchevsky S.E. // IEEE Trans. Magnetics. 1992. Vol. 28. N 1. P. 908–911.
- [11] Amoskov V., Belyakov V., Belyakova T., Firsov A., Gornikel I., Kaparkova M., Kukhtin V., Lamzin E., Larionov M., Sytchevsky S., Vasiliev V. // Europ. Cyclotron Progress Meeting (ECPM XXXVII, Groningen, The Netherlands). 2009. P. 38.