

ЦИКЛОТРОН ДЦ-280 – БАЗОВАЯ УСТАНОВКА ФАБРИКИ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

CYCLOTRON DC-280 - BASIC FACILITY OF THE FACTORY OF SUPERHEAVY ELEMENTS

*А. А. Протасов, И. В. Калагин, В. А. Семин, К. Б. Гикал, Д. К. Пугачев, А. А. Лукьянов,
П. И. Виноградов, Д. С. Яковлев, И. Г. Пищальников*

*A. A. Protasov, I. V. Kalagin, V. A. Semin, K. B. Gikal, D. K. Pugachev, A. A. Lukianov,
P. I. Vinogradov, D. S. Yakovlev, I. G. Pishchalnikov*

Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская область

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow Region

В Лаборатории ядерных реакции за последние 20 лет синтезировали пять новых элементов, завершающих седьмой период таблицы Менделеева. Все они были получены с использованием бомбардирующих ионов ^{48}Ca .

Наиболее тяжёлым элементом, синтезируемым в реакциях с ^{48}Ca , является элемент с $Z = 118$. Для синтеза более тяжёлых нуклидов необходимо использование более тяжёлых бомбардирующих частиц: ^{50}Ti , ^{54}Cr , и т. д. [1].

В 2019 году с целью повышения эффективности проведения экспериментов по синтезу СТЭ была запущена Фабрика сверхтяжелых элементов, базовой установкой которой является циклотрон ДЦ-280 [2].

Введение

После открытия сверхтяжелых элементов, опираясь на накопленные знания, а также учитывая прогресс, ученые и инженеры ЛЯР пришли к выводу, что можно повысить производительность известных изотопов СТЭ почти в 100 раз, создав новый экспериментальный комплекс – «Фабрика СТЭ» [1].

Одной из идей, лежащей в основе создания данного комплекса, является реализация циклотрона, который обеспечивает физические установки пучками положительно заряженных ионов с массовыми числами $A = 4 - 238$ интенсивностью до 10 микроампер · частиц для пучков ионов средних масс ($A \sim 50$).

Результатом работы коллектива ЛЯР ОИЯИ стал высокоточный изохронный циклотрон ДЦ-280 – базовая установка Фабрики сверхтяжелых элементов (рис. 1). Ускорительный комплекс включает в себя систему внешней аксиальной инжекции с высоковольтной платформой, магнитную и высокочастотную ускоряющую системы, flat-top систему, а также систему вывода пучка и каналы транспортировки к физическим установкам.

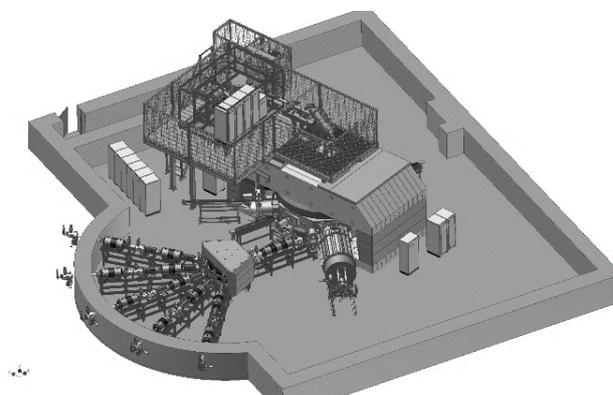


Рис. 1. 3D модель циклотрона ДЦ-280

Аксиальная инжекция

Для транспортировки пучков из источника ионов в центр циклотрона на ДЦ-280 используется система внешней аксиальной инжекции, в состав которой входят: фокусирующие соленоиды, магниты коррекции, анализирующий магнит, сферический электростатический дефлектор, полигармонический банчер, электростатическая линза и другие элементы.

Для достижения требуемых интенсивностей необходимо было увеличить полную эффективность трансмиссии пучка заряженных частиц до уровня порядка 50 %. В первую очередь, это достигается за счёт увеличения энергии инжекции до 50–80 кэВ на единицу заряда частицы [2]. Для соблюдения данного условия на ДЦ-280 установлена высоковольтная платформа напряжением до 70 кВ.

На платформе находится часть оборудования, такого как источник ионов DECRIS-PM, работающих на постоянных магнитах, анализирующий магнит, электростатическая линза и необходимая ионная оптика. После высоковольтной платформы установлены поворотный элемент – сферический электростатический дефлектор, полигармонический банчер и соленоиды.

Поворот в медианную плоскость осуществляется спиральным инфлектором [3]. Для обеспечения работы ускорителя при различных напряжениях инжекции на циклотроне используются два спиральных инфлектора с разными значениями магнитного радиуса (75 мм для инфлектора «А» и 92 мм для инфлектора «В»). Помимо этого, для коррекции вертикального размера пучка на выходе инфлектора установлена электростатическая квадрупольная линза. Она жестко закреплена относительно инфлектора. Потенциальная часть линзы установлена на изоляторах, размер которых по поверхности от электродов до платформы обеспечивает потенциал до ± 6 кВ. Конструкция инфлектора предусматривает механизм поворота, для подстройки радиуса заброса на стартовый радиус ускорения. Угол поворота составляет 26° .

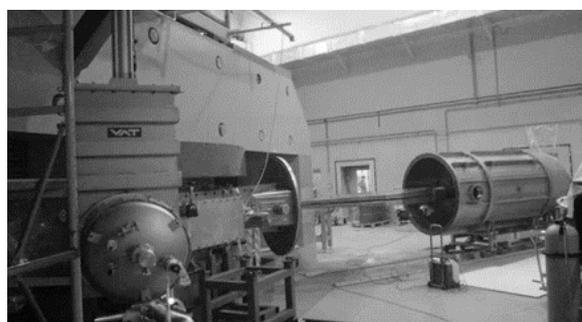
Ускоряющая система

Так как при создании циклотрона ДЦ-280 преследовалась цель ускорения и вывода пучков тяжелых ионов высокой интенсивности, необходимо было обеспечить высокий темп ускорения и высокое качество пучка. Ввиду этого, помимо основной ускоряющей системы на ускорителе была предусмотрена flat-top система. Она необходима для уменьшения импульсного разброса в пучке за счёт создания плоской вершины в широком диапазоне фаз суммарного ускоряющего поля.

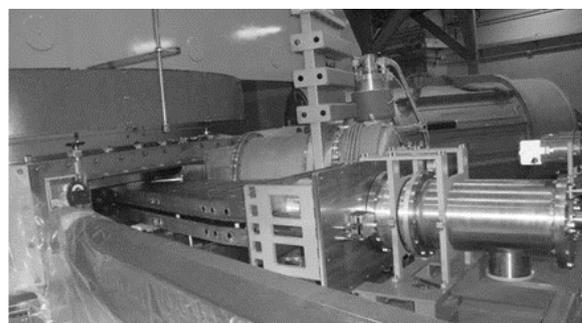
Суть способа уменьшения разброса по энергии состоит в том, что колебания основной и дополнительной гармоник ускоряющего напряжения

складываются таким образом, чтобы вершина результирующей кривой напряжения была как можно более плоской. Если все частицы, захваченные в режим ускорения, будут располагаться на этом плато, то они в процессе ускорения будут набирать одинаковую энергию.

Дуанты основной ускоряющей системы циклотрона ДЦ-280 расположены в долинах магнитной структуры диаметрально противоположно друг другу. Угловая протяженность каждого из них составляет 42° . Ускорение происходит на третьей гармонике обращения ионов. Система обеспечивает высокочастотное ускоряющее напряжение до 130 кВ в диапазоне частот 7,32–10,38 МГц. Состав ускоряющей системы циклотрона ДЦ-280 представлен на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Ускоряющая система циклотрона ДЦ-280. Слева (а) основная ускоряющая система, справа (б) – flat-top система

Дуанты flat-top системы угловой протяженностью 20° расположены на противоположных секторах. Flat-top система возбуждается на третьей гармонике относительно основной ускоряющей системы и работает в диапазоне 21,6–31,14 МГц при максимальном напряжении ускоряющего поля 13 кВ [4].

Магнитная система

Магнит циклотрона ДЦ-280 имеет «Ш»-образную форму и полюс диаметром 4 м и предназначен для создания ведущего и фокусирующего магнитного поля в диапазоне 0,65–1,35 Тл.

Для установки рабочих режимов циклотрона ДЦ-280 предусмотрена коррекция ведущего и фокусирующего магнитного поля при помощи радиальных катушек в количестве одиннадцати штук и в количестве двух пар азимутальных катушек (рис. 3). Обмотки радиальных катушек располагаются в пространстве между полюсом и секторами.

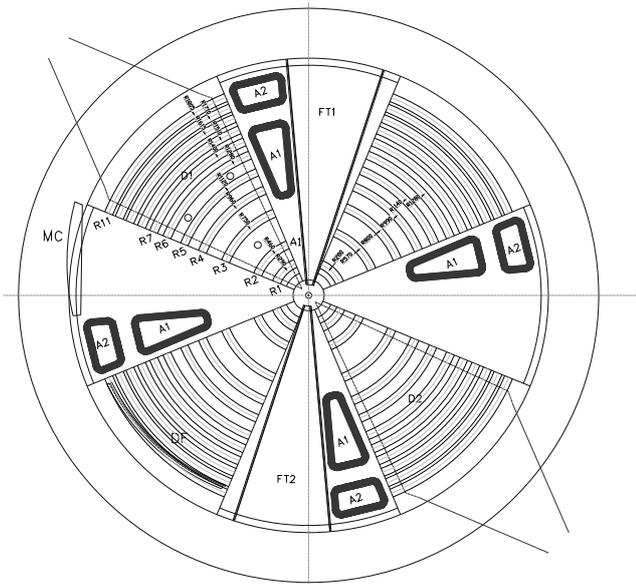


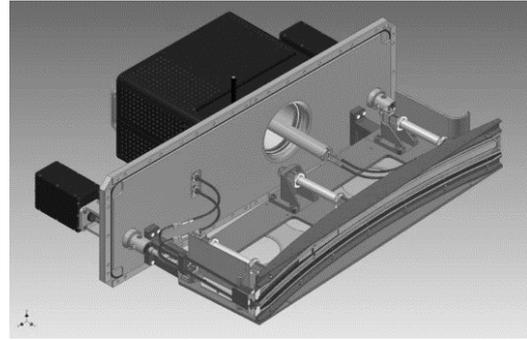
Рис. 3. Расположение радиальных и азимутальных катушек

Назначение 3-й и 11-й радиальных корректирующих катушек – коррекция среднего поля и положения медианной плоскости.

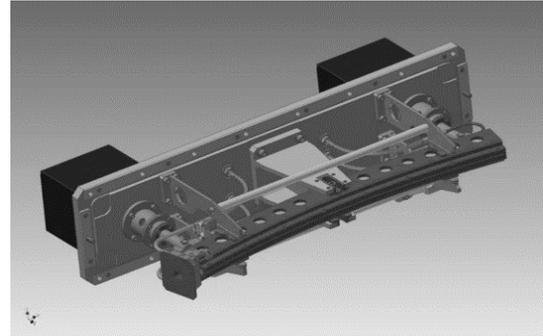
Обмотки азимутальных катушек располагаются на секторах со стороны рабочего зазора и служат для подстройки вывода пучка из циклотрона. Они отвечают за коррекцию в основной области ускорения и в области вывода.

Система вывода

Оптимальным решением для вывода ускоренного пучка тяжелых ионов из циклотрона является электростатическая система на базе дефлектора с напряженностью до 90 кВ/см (рис. 3). Дефлектор, азимутальной протяженностью 42°, располагается в долине на конечных радиусах. Зазор между потенциальным электродом и септумом составляет 10 мм.



а



б

Рис. 4. Элементы системы вывода. Слева (а) электростатический дефлектор, справа (б) пассивный магнитный канал

Для фокусировки пучка в процессе вывода в камере циклотрона используется пассивный магнитный канал. Он представляет собой набор стальных элементов, расположенных во внешнем магнитном поле и формирующих необходимую форму магнитного поля для горизонтальной фокусировки пучка. Фокусирующий градиент от канала $\approx 6\div 7$ Т/м.

Для согласования положения дефлектора, магнитного канала и выводной траектории существует возможность радиального перемещения входа и выхода каждого элемента на ± 12 мм.

Система транспортировки пучка

Каналы транспортировки и разводки используются для транспортировки многозарядных ионов из циклотрона ДЦ-280 к физическим установкам, расположенным в экспериментальных залах.

Достаточно разветвленная система каналов позволяет проводить многоплановые физические исследования. Данный ускорительный комплекс имеет систему транспортировки из пяти каналов разводки пучков. Переход с канала на канал выполняется коммутирующим магнитом ТМ с углами поворота $\pm 50^\circ$, 0° , $\pm 25^\circ$. Каждый канал включает в себя следующие системы:

- Ионно-оптическая система (квадрупольные линзы, магниты коррекции, поворотный магнит).
- Система диагностики пучка (блоки диагностики с элементами диагностики).
- Вакуумная система (вакуумные объемы, вакуумные насосы, датчики измерения вакуума, шиберы, клапаны).
- Система электропитания (источники питания).
- Система водоохлаждения и пневмосистема (подводящие магистрали, коллекторы, вентили).

Для полной остановки пучка в аварийной ситуации в каждом канале транспортировки после разводящего магнита предусмотрены два стоппера. Это устройство, которое устанавливается в отдельных корпусах в канале транспортировки пучка и работает по логике системы дозиметрической защиты. Чтобы выдерживать нагрев пучками мощностью до 3 кВт, стоппер охлаждается дистиллированной водой.

Система диагностики

Для определения интенсивности пучков ионов (тока пучка) в аксиальной инжекции и каналах транспортировки используются цилиндры Фарадея (рис. 4).

Всего в системе аксиальной инжекции установлено три цилиндра Фарадея: первый расположен после анализирующего магнита на высоковольтной платформе, второй расположен в горизонтальной части после ускорительной трубки и соленоида IS1, третий – в вертикальной части перед соленоидом IS2 *a, б*. На начальном участке канала транспортировки установлены цилиндры T0FC1 и T0FC2, а после разводящего магнита на каждом канале транспортировки до физической установки предусмотрено еще по 5 таких элементов диагностики.

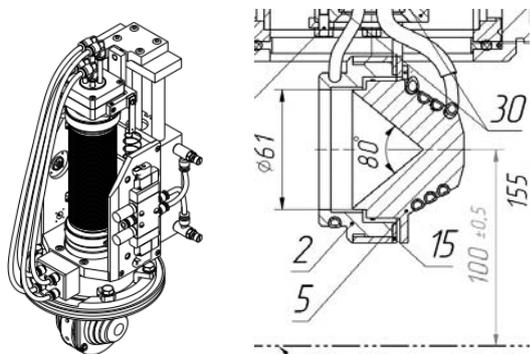


Рис. 5. Цилиндр Фарадея. Общий вид (слева), схема чашки (справа): 2-диафрагма, 5-чашка, 15-элементы магнитной системы

Цилиндр Фарадея — это устройство с подвижной измерительной частью, чашкой.

В процессе измерения чашка перекрывает траекторию движения пучка ионов. Ионы поглощаются в материале чашки и заряд, получаемый от ионов, обрабатывается АЦП и сигнал передается на пульт управления. Измеряемый заряд соответствует току пучка ионов. Точность измеряемого тока до 10^{-9} А.

Для исключения ошибки, возникающей из-за выбивания пучком ионов электронов с поверхности чашки, она имеет специальную форму в виде конуса.

Чашка цилиндра Фарадея имеет водяное охлаждение, так как мощность ускоренных пучков может достигать 3,5 кВт. Каналом охлаждения служит медная трубка, намотанная и запрессованная с наружной части чашки.

Также в ней установлена специальная магнитная система на постоянных магнитах, создающая поле, препятствующее движению электронов от поверхности чашки. Напряженность магнитного поля, в направлении перпендикулярном движению пучка, составляет не менее 250 Гс. Схема расположения магнитов и распределение магнитного поля представлены на рис. 6.

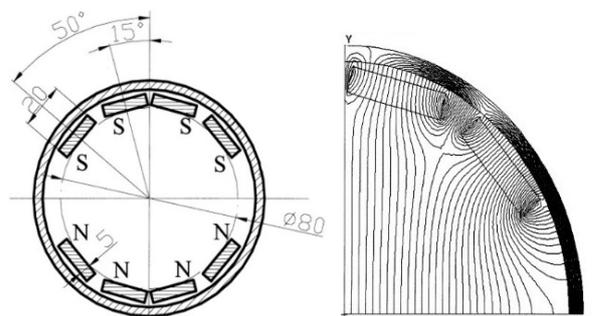


Рис. 6. Магнитная система чашки цилиндра Фарадея. Схема расположения магнитов (слева), распределение силовых линий (справа)

Цилиндры были опробованы с пучками разной интенсивности, разного размера и энергии. Устройства показали высокую точность измерения интенсивности ускоренного пучка, и высокую надежность в работе.

Для измерения интенсивности пучка внутри циклотрона используются специальные подвижные радиальные токовые пробники (рис. 7).

На ДЦ-280 установлено два подвижных пробника, расположенных диаметрально противоположно друг другу.

Пробники могут перемещаться в диапазоне радиусов от 263 до 1903 мм. Для определения тока

в пучок вводится детектирующая часть пробника, которая поглощает пучок ионов. Стекающий с измерительной головки заряд измеряется с помощью АЦП и показания выдаются на пульт управления.

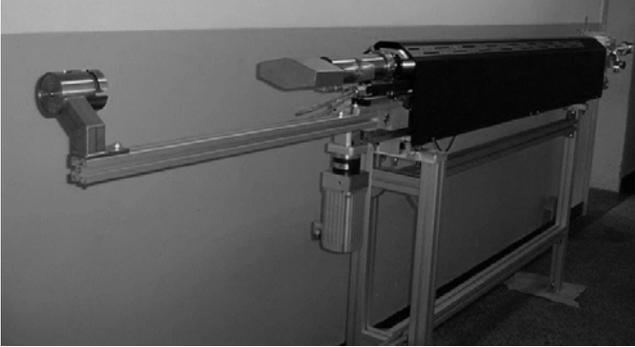


Рис. 7. Внутренний радиальный токовый пробник

Детектирующая часть пробника имеет водяное охлаждение. Она имеет специальную форму, с бортиками, препятствующими выходу выбитых с поверхности электронов. Высота бортиков 4 мм. Бортики и магнитное поле основного магнита циклотрона исключают ошибку измерения. Детектирующая часть пробника помещена в заземленный экран, для исключения наводок от ускоряющей системы циклотрона.

Для измерения интенсивности, положения и радиального профиля пучка между электростатическим дефлектором и пассивным магнитным каналом располагается многоламельный пробник, измерительная головка которого состоит из 6 изолированных вертикальных ламелей (рис. 8). Измерение тока пучка с каждой ламели дает информацию о положении и размерах пучка в радиальном направлении.

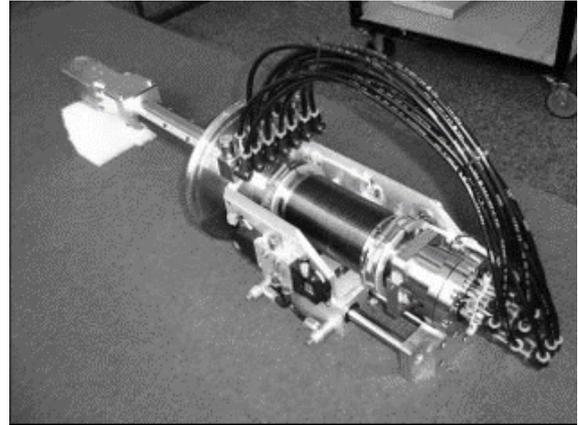


Рис. 8. Многоламельный пробник

Для измерения фазы ускорения ионов и контроля положения пучка по вертикали на циклотроне ДЦ-280 установлена система внутренних пикап-электродов (рис. 9).

Данная система создана с использованием 10 пар пикап-электродов, размещенных внутри камеры циклотрона вдоль радиуса сектора. Электрические сигналы, наведенные на электроды пролетающими банчами ионов, подаются в систему измерения по коаксиальным кабелям.

В системе измерения используется полосовой фильтр для выделения второй гармоники полезного сигнала. Сравнивая сигналы с пикап-электродов, находящихся на разных радиусах, мы получаем данные о сдвиге фазы в процессе ускорения. Аналогичным образом, при сравнении амплитуды сигналов от двух электродов одной пары, мы можем оценить положение пучка относительно медианной плоскости [5].

Для определения пространственного распределения (профиля) пучка в системе аксиальной инъекции и каналах транспортировки используются люминофоры с камерой, а также двухмерные ионизационные мониторы профиля пучка, кото-

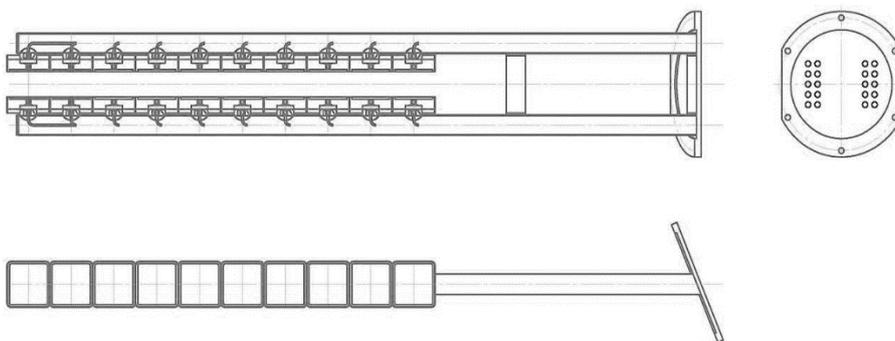


Рис. 9. Система внутренних пикап-электродов

рые позволяют не только определить размеры пучка, но и его положение относительно канала транспортировки [6].

Для контроля осевого прохождения пучка в каналах транспортировки установлены секционные датчики потерь. Он выполнен в виде разрезанного на 4 равные части (коллекторы) кольца, которые электрически изолированы от корпуса и соседних коллекторов. Токковый сигнал снимается с каждой части и подается через внешний разъем BNC-50, расположенного на корпусе датчика, в систему измерения. Внутренний диаметр датчика потерь составляет 80 мм.

Результаты первых экспериментов по синтезу СТЭ на Фабрике СТЭ

В настоящее время на Фабрике сверхтяжелых экспериментов введены в эксплуатацию две физические установки. Это газонаполненные сепараторы DGFRS-II для синтеза сверхтяжелых элементов и DGFRS-III для изучения химических свойств СТЭ и ядерной спектроскопии сверхтяжелых нуклидов.

С 2020 года по настоящее время в экспериментах на газонаполненном сепараторе DGFRS-2 было получено 125 новых цепочек $^{286-289}\text{Mc}$ в реакции $^{48}\text{Ca}+^{243}\text{Am}$ при 37 цепочках на DGFRS (ГНС на циклотроне У-400) в период с 2003 по 2012. Помимо этого, было зафиксировано 94 цепочки распада $^{286,287}\text{Fl}$ в реакции $^{48}\text{Ca}+^{242}\text{Pu}$ при интенсивности пучка до 3 микроампер·частиц и 16 новых цепочек ^{283}Cn в реакции $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$ при интенсивности пучка до 6,5 микроампер·частиц. Для сравнения, на той же установке DGFRS за все время работы было получено 32 цепочки распада $^{286,287}\text{Fl}$ и ^{283}Cn .

На Фабрике сверхтяжелых элементов впервые в мире были получены семь новых изотопов

сверхтяжелых элементов: ^{264}Lr , ^{286}Mc , ^{276}Ds , ^{275}Ds , ^{272}Hs , ^{267}Sg и ^{268}Sg . Тот факт, что за три года работы Фабрики были открыты сразу несколько неизвестных ранее изотопов, указывает на то, что это передовой исследовательский комплекс, задающий новые стандарты в области синтеза и изучения свойств сверхтяжелых элементов.

Список литературы

1. Oganessian Yu. Ts., Dmitriev S. N. // Russ. Chem. Rev., 2016. 85 (9) P. 901–916. [Успехи химии, 2016. 85 (9). С. 901–916].
2. Гульбемян Г. Г., Бузмаков В. А., Зарубин В. Б. и др. «FLAT-TOP» система циклотрона ДЦ-280 // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10, № 4(181). С. 587–602.
3. Гульбемян Г. Г., Дмитриев С. Н., Иткис М. Г. и др. Запуск циклотрона ДЦ-280 – базовой установки Фабрики сверхтяжелых элементов ЛЯР ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16, № 6(225). С. 653–665.
4. Гульбемян Г. Г., Гикал Б. Н., Бехтерев В. В. и др. Проект системы аксиальной инжекции для циклотрона ДЦ-280 // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 6(190). С. 1181–1186. URL: http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2014.
5. Semin V. A., Bogomolov S. L., Gikal K. et al. // The experimental research of cyclotron DC-280 beam parameter, 27th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2021), Alushta, Russia doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRA04.
6. Тетерев Ю. Г., Исатов А. Т., Митрофанов С. В., Крылов А. И. Модернизация сканирующего двухмерного ионизационного монитора профиля в каналах транспортировки пучка // Приборы и техника эксперимента, 2020. № 6. С. 5–10.