

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Физика. Астрономия сериясы, 2021, том 134, №1, 29-36 беттер  
<http://bulphysast.enu.kz>, E-mail: vest\_phys@enu.kz

МРНТИ: 29.29.39; 29.29.31

Е.К. Самбаев<sup>1,2</sup>, В.Н. Логинов<sup>3</sup>, С.Л. Богомолов<sup>3</sup>, А.Е. Бондарченко<sup>3</sup>, И.А. Иванов<sup>1,2</sup>,  
М.В. Колобердин<sup>1,2</sup>, А.Е. Курахмедов<sup>1,2</sup>, А. Сапар<sup>1</sup>, Г.К. Абдугалимов<sup>1</sup>, Е. Унгарбаев<sup>1</sup>,  
А.Д. Темір<sup>1,2</sup>, Д.А. Мустафин<sup>1</sup>, М.В. Здоровец<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Астанинский филиал РГП «Институт ядерной физики» РК, Нур-Султан, Казахстан

<sup>2</sup> Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

<sup>3</sup> Международная межправительственная организация «Объединенный институт ядерных исследований», Дубна, Россия

(E-mail: <sup>1,2</sup> Sambahayev.Ernaz@gmail.com, <sup>3</sup> loginov@jinr.ru, <sup>3</sup> sbogomolov@jinr.ru,  
<sup>3</sup> bondarchenko@jinr.ru, <sup>1,2</sup> Igor.Ivanov.inp@gmail.com, <sup>1,2</sup> koloberdin\_m@rambler.ru,  
<sup>1,2</sup> Kurahmedov1992@mail.ru, <sup>1</sup> sapar2603@gmail.com, <sup>1</sup> abdulgalimovg@gmail.com,  
<sup>1</sup> ye1.7ung@gmail.com, <sup>1,2</sup> adilet.temir@mail.ru, <sup>1</sup> dmustafin1983@gmail.com,  
<sup>1,2</sup> MZdorovets@gmail.com)

### Модернизация ЭЦР-источника DECRIS-3

**Аннотация:** ускоритель тяжелых ионов ДЦ-60 оснащен ЭЦР-источником DECRIS-3. Источник многозарядных ионов предназначен для получения пучка ионов различных элементов со степенью ионизации  $\geq 1$ . Полученный пучок многозарядных ионов после селекции необходимого заряда может быть инжектирован в ускоритель для получения более высокой энергии, либо транспортирован на физическую установку для проведения экспериментов с пучком низкой энергии.

В данной статье описаны основные характеристики ЭЦР-источника DECRIS-3. В процессе работы на циклотроне ДЦ-60 появились предпосылки к улучшению характеристик ЭЦР-источника, а также за время эксплуатации ухудшились характеристики магнитного поля источника - все это привело к осознанию необходимости модернизации ЭЦР-источника. Улучшение характеристик ЭЦР-источника позволяет увеличить спектр возможностей циклотрона, что открывает новые перспективы перед экспериментаторами.

Совместно с сотрудниками Лаборатории ядерных реакций Объединённого института ядерных исследований были сделаны техническое обоснование и техническое задание для модернизации ЭЦР-источника. Схематически представлены изменения в ЭЦР-источнике, сделаны расчеты магнитного поля. Конструктивные изменения в источнике позволят получать более высокозарядные и высокоинтенсивные пучки ионов, что расширяет возможности циклотрона ДЦ-60.

**Ключевые слова:** ЭЦР-источник, ион, ионизирующее излучение, ускорительная техника, ДЦ-60.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2021-134-1-29-36>

Поступила: 15.01.2021 / Допущена к опубликованию: 29.01.2021

**Введение.** С момента ввода в эксплуатацию, в 2006 году, на базе ускорителя тяжёлых ионов ДЦ-60 проводится множество работ прикладного и фундаментального характера, в том числе проведены множество экспериментов, послуживших основой для дипломных и диссертационных работ студентов казахстанских высших учебных заведений, а также коллаборационные эксперименты, результаты которых нашли отражение в международных рецензируемых журналах с ненулевым импакт-фактором.

Основу ускорительного комплекса составляет циклотрон ДЦ-60, способный ускорять интенсивные пучки тяжелых ионов от лития (Li) до ксенона (Xe) с энергией от 0.35 до 1.75 МэВ/нуклон. На ускорителе также имеется канал пучков ионов низких энергий от 10 до 25 кэВ/заряд, получаемых из внешнего источника ионов, работающего по принципу электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР-источник) типа DECRIS-3. [1, 2].

ЭЦР-источник DECRIS-3 оснащен СВЧ генератором VZU-6997AD 750W СМРА с

использованием лампы бегущей волны (ЛБВ) производства CPI-Communication & Power Industries Satcom division. Рабочая частота данного генератора - 14,5 ГГц [3]. Многозарядные ионы в ЭЦР-источниках образуются в результате ступенчатой ионизации. Нагрев электронов в плазме осуществляется электромагнитной волной с частотой, равной циклотронной частоте электронов в районе резонансного магнитного поля[4]. В таблице 1 представлены интенсивности для стандартных режимов работы ЭЦР источника DECRIS-3.

Таблица 1 - Интенсивность некоторых пучков ионов ( $\mu A$ ) ЭЦР-источника для циклотрона ДЦ-60 в обычном режиме эксплуатации (Q - заряд иона)

Q	1+	2+	4+	5+	6+	7+	8+	9+	10+	11+	12+	13+	15+	17+	19+	21+	23+
<sup>4</sup> He	1000	100															
<sup>7</sup> Li	100	100															
<sup>11</sup> B		100	20														
<sup>14</sup> N			250	250	20												
<sup>16</sup> O			250	250	100	20											
<sup>20</sup> Ne			100	100	60	35	20										
<sup>40</sup> Ar							200	100	50	30							
<sup>84</sup> Kr							70	50	40	30	20	20	12				
<sup>132</sup> Xe												30	17	15	15	5	3

Основными характеристиками ЭЦР-источника подлежащими модернизации, являются:

- Увеличение внутреннего объёма ионизационной камеры;
- Изменение конструкции гексаполя, служащего для формирования радиального магнитного поля, удерживающего плазму, с конфигурацией "минимум В";
- Изменение конструкции коаксиального bies электрода на плоский;
- Изменение конструкции системы ввода рабочих веществ во внутренний объём камеры;
- Изменение конструкции СВЧ-волновода источника.

Вышеуказанные нововведения предназначены для качественного улучшения характеристик ионного пучка на выводе из источника. Данное решение было основано на таких фактах, как энергия иона, определяющая глубину проникновения иона в облучаемый материал, определяется выбранным зарядовым состоянием и ограничивается максимальным напряжением экстракции. С другой стороны, ионный ток, который определяет время достижения требуемых ионных флюенсов, т.е. время облучения материала, обычно меньше для более высокого зарядового состояния. Следовательно, расширенные возможности создания более высоких токов ионных пучков с высоким зарядом означают, что возможности проведения экспериментов по облучению с помощью источника ионов стали шире [5].

**Предпосылки к модернизации ЭЦР-источника.** Основной целью проведения модернизации источника ионов является увеличение спектра нарабатываемых ионов более высокой зарядности. Это обусловлено повышенным интересом научного сообщества к пучкам ионов Kr и Xe с максимально возможной энергией пучков. Одно из применений данного типа ионов это моделирование процессов деления урана в реакторах, с осколками деления с энергиями около 200 МэВ. Также увеличение интенсивности пучков ионов на выходе из ЭЦР-источника позволит увеличить интенсивность ионного пучка на мишени, что сократит время проведения экспериментов за счёт быстрого набора необходимого флюенса, что приведет к сокращению затрат на эксперименты и экономии бюджетных средств.

Еще одним из немаловажных факторов является физическое и механическое устаревание элементов конструкции оборудования. За 14 лет эксплуатации в условиях воздействия высоких температур и ионизирующего излучения ухудшились характеристики магнитного поля гексаполя, состоящего из системы постоянных магнитов. Этому свидетельствует ряд изменений рабочих характеристик источника ионов при ионизации рабочего вещества в

стандартных режимах эксплуатации:

- Распыление коаксиального bias под воздействием плазмы;
- Локальное выгорание защитного экрана от углеродного напыления, изготовленного из листов нержавеющей стали (свидетельство данного факта изображено на рис. 1);
- Изменение отпечатка, оставляемого ионизированным пучком рабочего вещества на вытягивающем плазменном электроде (рис. 2);
- Также было замечено снижение интенсивности нарабатываемых пучков ионов высоких зарядностей, следствием чего является ухудшение сепарации пучка с использованием 90-градусного анализирующего магнита (на получаемых спектрах плохо различимы пики ионов разных зарядов в высокозарядной составляющей ионного пучка).



Рисунок 1 – Защитный экран внутренней поверхности плазменной камеры со следами соприкосновения с плазмой и локального нагрева

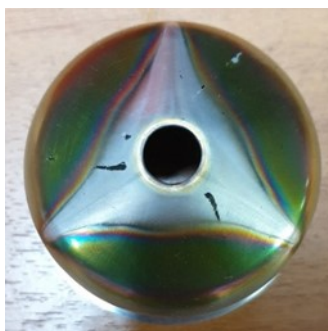


Рисунок 2 – След ионного пучка в области экстракции ЭЦР-источника на плазменном электроде

Помимо выявленных ухудшений в работе источника, за время эксплуатации был замечен ряд конструкторских решений, затрудняющих нормальную эксплуатацию источника:

- Конструктивно bias электрод выполнен из двух частей: коаксиальная трубка в цилиндре с миллиметровыми зазорами между элементами. Коаксиальная трубка, связанная с заземлённым цилиндром набором керамических изоляторов, находится под высоким потенциалом. С этим связана одна из основных сложностей - коаксиальная конструкция bias электрода, служащего одновременно и каналом ввода рабочих веществ в ионизационную камеру, и отжимающим электроны к периферии плазмы электродом, пресекая тем самым эффект перезарядки ионов, находится под постоянным воздействием рабочих веществ и плазмы, из-за чего изоляторы покрываются токопроводящим слоем и замыкают потенциал на корпус.

- Поскольку коаксиальная трубка является каналом ввода всех рабочих веществ, включая и твёрдые вещества с держателем и микропечью, подготовка источника требует точной юстировки. Микропечь проходит через длинную узкую трубку, находящуюся под высоким потенциалом, и не должна касаться стенок. Сложность ко всему этому добавляет то, что микропечь часто двигается внутри канала в зависимости от интенсивности и нагрева плазмы в источнике, тем самым регулируя нагрев твёрдого рабочего вещества.
- Немаловажную сложность вызывает тот момент, что ввод держателя микропечи производится в центре источника, точно на оси ионного источника. Взаимодействие печи с плазмой вызывает ее дополнительный нагрев, из-за чего режимы ионизации твёрдых веществ могут отличаться из раза в раз.

**Модернизация ЭЦР-источника ионов.** Для решения вышеуказанных проблем совместно с сотрудниками Лаборатории ядерных реакций Объединённого института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ) было составлено техническое задание на модернизацию источника, включающую в себя такие изменения, как увеличение объема ионизационной камеры и изменение ее формы, частичная реконструкция магнитной структуры и полная реконструкция инжекционной части корпуса источника [6]. Схематично структуры старого ЭЦР-источника DECRIS-3 и модернизированного источника представлены на рисунках 3 и 4.

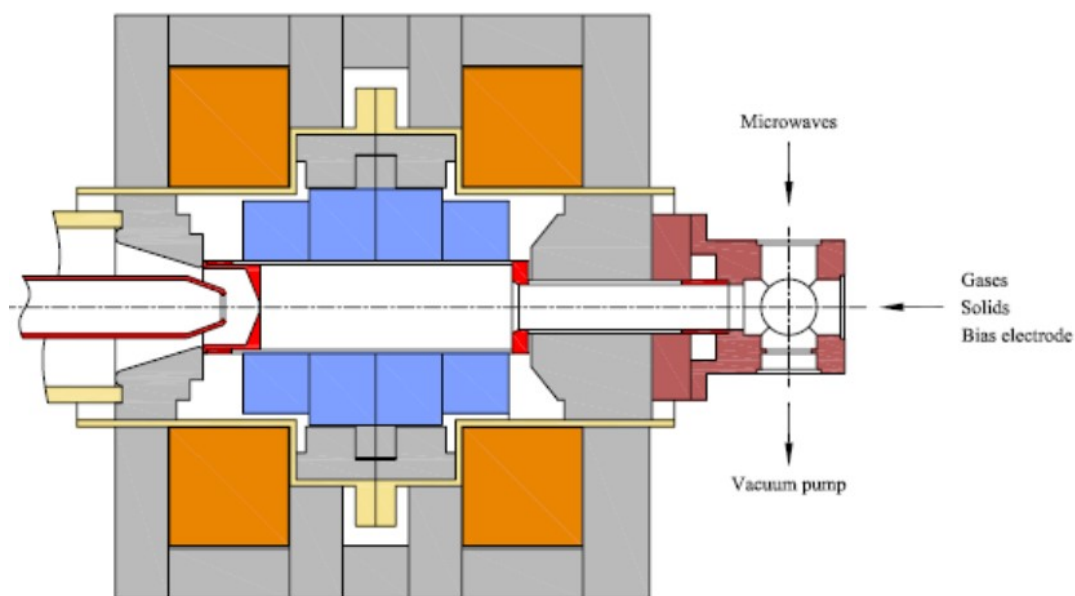


Рисунок 3 – Схема ЭЦР-источника DECRIS-3

Одним из ключевых изменений будет увеличение внутреннего диаметра плазменной камеры с 64 мм до 74 мм. Следовательно, это также должно увеличить объем плазмы и время жизни ионов и позволит получить пучки ионов с более высоким зарядовым состоянием и более высокие интенсивности пучков. Такая реконструкция потребует внесения некоторых изменений в магнитную структуру и введения совершенно новой инжекционной камеры.

Обновлённая двустенная ионизационная камера с водяным охлаждением имеет постоянный диаметр и полностью изготовлена из нержавеющей стали. Это существенно упрощает конструкцию камеры и снижает ее стоимость.

Также изменениям подвергнется прямоугольный волновод, WR-62 с сечением 16 x 8 мм, что позволит повысить эффективность использования СВЧ-мощности и исключит существенные потери мощности в коаксиально-волноводном переходе, который используется в оригинальной конструкции источника, а также неконтролируемое газоотделение, возникающее при нагреве элементов коаксиально-волноводного перехода. Работа источника на пониженной мощности

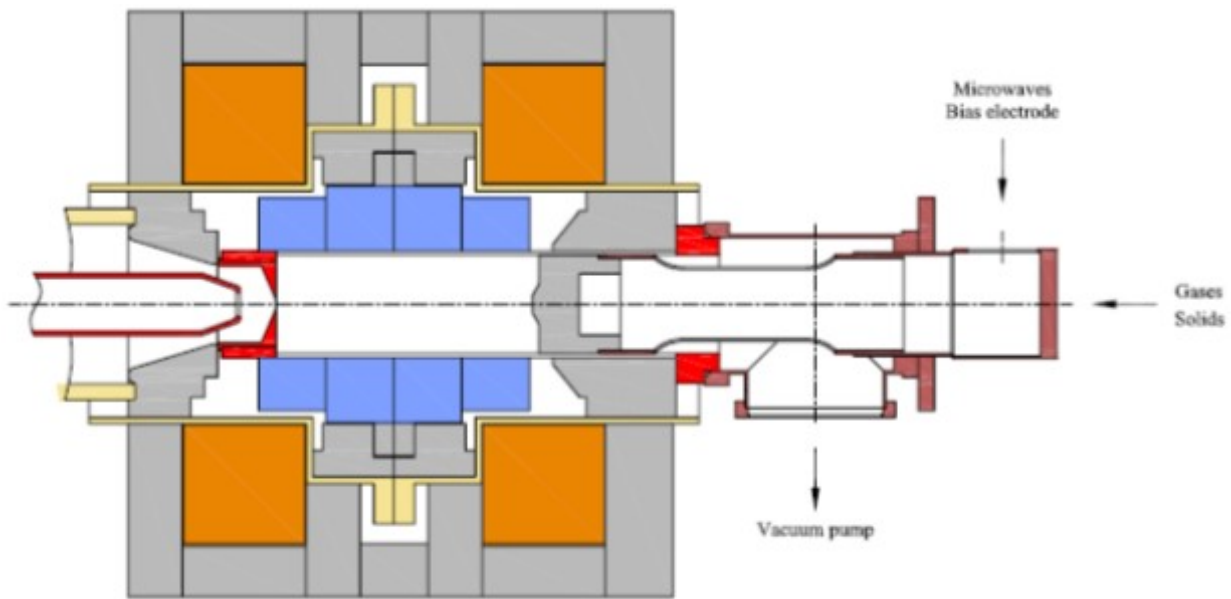


Рисунок 4 – Схема модернизированного ЭЦР-источника DECRIS-3, согласно техническому заданию

увеличивает срок службы СВЧ-усилителя.

Новый гексаполь имеет структуру типа Хальбаха и состоит из 24 идентичных трапецевидных секторов из материала постоянного магнита (NdFeB). Чтобы получить равномерное распределение магнитного поля вдоль полюса, каждый сектор был сделан из цельного магнитного материала. Эта технология устранит некоторые недостатки магнитного поля вблизи переходов постоянных магнитов. Использование дополнительных железных масс специальной конструкции в области инжекции позволяет увеличить уровень максимума аксиального магнитного поля со стороны инжекции (рис. 5), что позволяет существенно ограничить процесс диффузии ионов в область инжекции и, соответственно, увеличить токи извлекаемых многозарядных ионов.

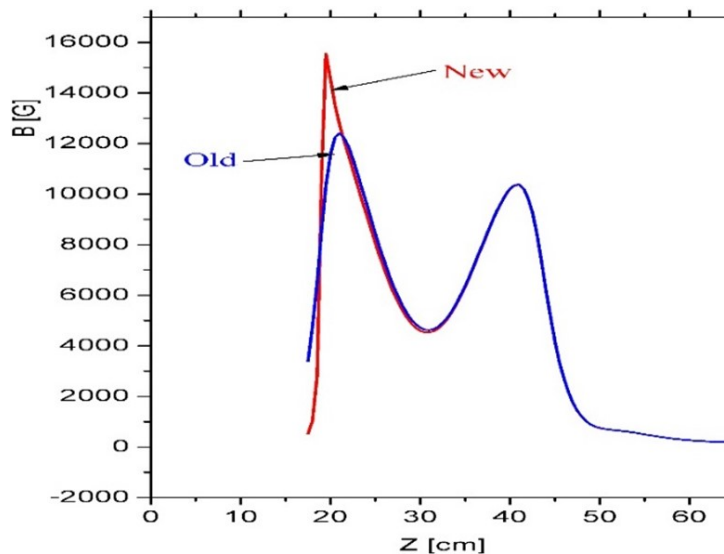


Рисунок 5 – Аксиальное распределение магнитного поля источника DECRIS-3

Обновлённая конструкция ввода микropечи с увеличенным диаметром позволит использовать микropечь для подачи твердых веществ большего объема, что приводит к увеличению времени непрерывной работы ионного источника на твердых веществах, а также предоставляет возможность использования микropечей с большей максимальной

температурой нагрева.

На основе технического задания на модернизацию разработаны общая компоновка и трехмерная модель модернизированного ЭЦР-источника DECRIS-3, представленная на рисунке 6.

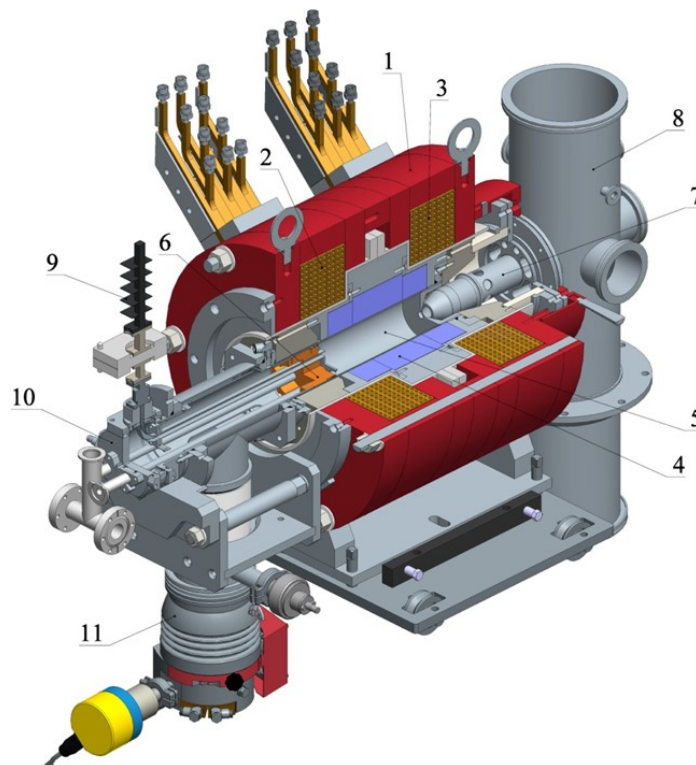


Рисунок 6 – Трехмерная модель модернизированного ЭЦР источника DECRIS-3: 1 - магнитное ярмо, 2, 3 - токовые обмотки, 4 - гексаполь, 5 - плазменная камера, 6 - дополнительная ферромагнитная вставка, 7 - подвижный электрод экстракции, 8 - блок экстракции, 9 - стандартный волновод, 10 - узел ввода СВЧ и рабочих веществ (закоротка), 11 - турбомолекулярный насос

**Заключение.** Модернизация ЭЦР-источника направлена на улучшение текущих характеристик источника DECRIS-3 и упрощение технического сопровождения установки во время планово-профилактических работ для поддержания рабочего состояния оборудования.

Повышение интенсивности высокозарядной составляющей ионного пучка приводит к расширению возможности оборудования, что в свою очередь приводит к увеличению возможностей экспериментаторов.

### Список литературы

- 1 Гикал Б.Н., Иткис М.Г., Кадыржанов К.К., Сисакян А.Н. и др. Обоснование создания в Евразийском национальном университете им. Л.Н. Гумилева междисциплинарного научно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов. Отчет УДК 621.384.6.5. - Алма-Ата, 2003. - 67 с.
- 2 Gikal B., Dmitriev S., Apel P., Bogomolov S., Borisov O., Vuzmakov V., Gulbekyan G., Ivanenko I., Ivanov O. DC-60 Heavy Ion Cyclotron Complex: The First Beams and Project Parameters // Physics of Particles and Nuclei Letters. - 2008. - Vol. 5. - № 7. - P. 642-644.
- 3 Иванов И.А., Здоровец М.В., Колобердин М.В., Александренко В.В., Козин С.Г., Самбаев Е.К., Курахмедов А.Е., Кадыржанов Д.Б. Модернизация ЭЦР-источника на циклотроне ДЦ-60 // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилёва - 2016. - Т. 113. - № 4. - С. 201-207.
- 4 Браун Я. Физика и технология источников ионов. - Москва: Издательство Мир, 1997. - 496 с.
- 5 Efremov A., Bogomolov S., Bekhterev V., Dobrosavljevic A., Neskovic N. Upgrading the ECR ion source within FAMA // Nuclear Technology and Radiation Protection. - 2018. - Т. 33. - № 1. - P. 47-52.
- 6 Bekhterev V., et al. Modernization of the mVINIS Ion Source // The 21st International Work shop on ECR Ion Sources. - Nizhny Novgorod: ISBN 978-3-95450-158-8, 2014. - P. 68-70.

Е.К. Самбаев<sup>1,2</sup>, В.Н. Логинов<sup>3</sup>, С.Л. Богомолов<sup>3</sup>, А.Е. Бондарченко<sup>3</sup>, И.А. Иванов<sup>1,2</sup>, М.В. Колобердин<sup>1,2</sup>, А.Е. Курахмедов<sup>1,2</sup>, А. Сапар<sup>1</sup>, Г.К. Абдугалимов<sup>1</sup>, Е. Унгарбаев<sup>1</sup>, А.Д. Темір<sup>1,2</sup>, Д.А. Мустафин<sup>1</sup>, М.В. Здоровец<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ҚР «Ядролық физика институтының» РМК Астана филиалы, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

<sup>2</sup> Гумилев Л.Н. атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

<sup>3</sup> Халықаралық үкіметаралық ұйым «Ядролық зерттеулердің бірлескен институты», Дубна, Ресей

### DECRIIS-3 ЭЦР-көзінің модернизациясы

**Аннотация.** ДЦ-60 ауыр ион үдеткіші DECRIIS-3 ЭЦР-көзімен жабдықталған. Көп зарядталған иондардың көзі әртүрлі элементтердің иондану дәрежесі  $\geq 1$  ондарының сәулесін шығаруға арналған. Алынған көп зарядталған иондар, қажетті зарядты таңдағаннан кейін, үдеткішке жоғары энергия алу үшін енгізілуі немесе сәулесі энергия аз физикалық тәжірибелер үшін қолданылуы мүмкін.

Мақалада DECRIIS-3 ЭЦР көзінің негізгі сипаттамалары көрсетілген. ДЦ-60 циклотронында жұмыс істеу барысында ЭЦР-көзінің сипаттамаларын жақсартудың алғышарттары пайда болды, сонымен қатар, жұмыс кезінде көздің магнит өрісінің сипаттамалары нашарлады, осының бәрі ЭЦР көзін жаңарту қажеттілігін тудырады. ЭЦР-көзінің сипаттамаларын жақсарту циклотронның жұмыс спектрін арттыруға мүмкіндік береді, бұл экспериментаторлар үшін жаңа перспективалар ашады.

Ядролық зерттеулердің бірлескен институты Ядролық реакция зертханасының қызметкерлерімен бірге ЭЦР-көзін жаңартудың техникалық негіздемесі мен техникалық тапсырмасы жасалды. ЭЦР-көзінің өзгерістері схемалық түрде көрсетіліп, магнит өрісі есептеледі. Көздің конструктивті өзгерістері ДЦ-60 циклотронының мүмкіндіктерін кеңейтетін негүрлым жоғары зарядталған және жоғары интенсивті ион сәулелерін алуға мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** ЭЦР-көзі, ион, иондаушы сәулелену, үдеткіш жабдық, ДЦ-60 циклотроны.

Ye. Sambayev<sup>1,2</sup>, V.N. Loginov<sup>3</sup>, S.L. Bogomolov<sup>3</sup>, A.Ye. Bondarchenko<sup>3</sup>, I. Ivanov<sup>1,2</sup>, M.V. Koloberdin<sup>1,2</sup>, A.Ye. Kurakhmedov<sup>1,2</sup>, A. Sapar<sup>1</sup>, G.K. Abdugalimov<sup>1</sup>, Ye.O. Ungarbayev<sup>1</sup>, A.D. Temir<sup>1,2</sup>, D.A. Mustafin<sup>1</sup>, M.V. Zdorovets<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, Nur-Sultan, Kazakhstan

<sup>2</sup> L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

<sup>3</sup> The Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

### Modernization of ECR-source DECRIIS-3

**Abstract.** The heavy ion accelerator DC-60 is equipped with an ECR source DECRIIS-3. The source of multiply charged ions is designed to produce a beam of ions of various elements with a degree of ionization  $\geq 1$ . The obtained beam of multiply charged ions, after selecting the required charge, can be injected into an accelerator to obtain a higher energy, or transported to a physical installation for experiments with a low energy beam.

This article describes the main characteristics of the DECRIIS-3 ECR source. In the course of operation at the DC-60 cyclotron, prerequisites appeared for improving the characteristics of the ECR source, and also during the operation, the characteristics of the magnetic field of the source worsened, all this led to the realization of the need to modernize the ECR source. Improving the characteristics of the ECR source makes it possible to increase the spectrum of capabilities of the cyclotron, which opens up new prospects for experimenters.

A technical justification and terms of reference for the modernization of the ECR source were made jointly with Nuclear Reaction Laboratory staff of the Joint Institute for Nuclear Research and the authors of the research. Changes in the ECR source are shown schematically, and the magnetic field is calculated. Constructive changes in the source will make it possible to obtain more highly charged and high-intensity ion beams, which expands the capabilities of the DC-60 cyclotron.

**Keywords:** ECR source, ion, ionizing radiation, accelerator technology, DC-60.

## References

- 1 Gikal B.N., Itkis M.G., Kadyrzhanov K.K., Sisakyan A.N. et al. Obosnovaniye sozdaniya v Yevrasiyskom national'nom universitete im. L.N. Gumileva mezhdistsiplinarnogo nauchno-issledovatel'skogo kompleksa na baze uskoritelya tyazholykh ionov [Rationale for the creation at L.N. Gumilyov Eurasian National University of the interdisciplinary research complex based on the heavy ion accelerator] (Alma-ata, 2003, 67 p.). [in Russian]
- 2 Gikal B., Dmitriev S., Apel P., Bogomolov S., Borisov O., Buzmakov V., Gulbekyan G., Ivanenko I., Ivanov O. DC-60 Heavy Ion Cyclotron Complex: The First Beams and Project Parameters, Physics of Particles and Nuclei Letters, 5(7), 642-644 (2008).
- 3 Ivanov I.A., Zdorovets M.V., Koloberdin M.V., Alexandrenko V.V., Kozin S.G., Sambaev Ye.K., Kurakhmedov A.Ye., Kadyrzhanov D.B. Modernizatsiya ECR-istochnika na ciklotrone DC-60, Vestnik L.N. Evrazijskij national'nyj universitet imeni Gumileva [Modernization of the ECR source at the DC-60 cyclotron, Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University], 4(113), 201-207 (2016). [in Russian]
- 4 Braun Ya. Fizika i tekhnologiya istochnikov ionov [Ion Source Physics and Technology] (Moscow: Mir Publishing House, 1997, 496 p.). [in Russian]
- 5 Efremov A., Bogomolov S., Bekhterev V., Dobrosavljevic A., Neskovic N. Upgrading the ECR ion source within FAMA, Nuclear Technology and Radiation Protection, 33(1), 47-52 (2018).
- 6 Bekhterev, V., et al. Modernization of the mVINIS Ion Source, The 21st International Work shop on ECR Ion Sources, Nizhny Novgorod: ISBN 978-3-95450-158-8, 2014, P. 68-70.

**Сведения об авторах:**

*Самбаев Е.К.* - начальник службы ВЧ систем и ЭЦР источника, Астанинский филиал Института ядерной физики, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Логинов В.Н.* - ведущий инженер НТОУ, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри, 6, Дубна, Московская обл., Россия.

*Богомолов С.Л.* - кандидат технических наук, начальник сектора НТОУ, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри, 6, Дубна, Московская обл., Россия.

*Бондарченко А.Е.* - инженер сектора НТОУ, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри, 6, Дубна, Московская обл., Россия.

*Иванов И.А.* - **основной автор**, начальник циклотрона ДЦ-60, Астанинский филиал Института ядерной физики, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Колобердин М.В.* - главный инженер Астанинского филиала Института ядерной физики, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Куррахмедов А.Е.* - начальник технологической службы циклотрона ДЦ-60, Астанинский филиал Института ядерной физики, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Сапар А.Д.* - инженер службы управления, Астанинский филиал Института ядерной физики, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Абдугалимов Г.К.* - инженер службы ВЧ систем и ЭЦР источника, Астанинский филиал Института ядерной физики, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Унгарбаев Е.О.* - инженер службы ВЧ систем и ЭЦР источника, Астанинский филиал Института ядерной физики, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Темір А.М.* - докторант ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, инженер технологической службы циклотрона ДЦ-60, Астанинский филиал Института ядерной физики, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Мустафин Д.А.* - начальник службы управления, Астанинский филиал Института ядерной физики, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Здоровец М.В.* - кандидат физико-математических наук, доцент Международной кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, директор Астанинского филиала Института ядерной физики, Астанинский филиал Института ядерной физики, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Sambayev Ye.K.* - Head of HF systems an ECR ource service, Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, 2/1 Abylai Khan ave., Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Loginov V.N.* - Leading FLNR Engineer, Laboratory of Nuclear Reactions named by G.N. Flerov of International intergovernmental organization Joint institute for nuclear research, st. Joliot-Curie 6, Dubna, Russia.

*Bogomolov S.L.* - Candidate of Engineering Science, Head of FLNR sector, G.N. Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of The joint Institute for Nuclear Research, st. Joliot-Curie 6, Dubna, Russia.

*Bondarchenko A.Ye.* - Engineer of FLNR sector, Laboratory of Nuclear Reactions named by G.N. Flerov of International intergovernmental organization Joint institute for nuclear research, st. Joliot-Curie 6, Dubna, Moscow region, Russia.

*Ivanov I.A.* - **The main author**, Head of DC-60 cyclotron, Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, 2/1 Abylai Khan ave., Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Koloberdin M.V.* - Chief engineer of the Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, 2/1 Abylai Khan ave., Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Kurakhmedov A.Ye.* - Head of technologycal service of DC-60 cycloton, Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, 2/1 Abylai Khan ave., Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Sapar A.D.* - Engineer of operating service, Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, 2/1 Abylai Khan ave., Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Abdugalimov G.K.* - Engineer of HF system and ECR source service, Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, 2/1 Abylai Khan ave., Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Ungarbayev Ye.O.* - Engineer of technologycal service, Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, 2/1 Abylai Khan ave., Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Temir A.M.* - Engineer of technologycal service, Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, 2/1 Abylai Khan ave., Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Mustafin D.A.* - Head of operating service, Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, 2/1 Abylai Khan ave., Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Zdorovets M.V.* - Candidate of physical and mathematical sciences, Associate Professor at the International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies of the Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, director of the Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, 2/1 Abylai Khan ave., Nur-Sultan, Kazakhstan.