

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-3-40-45>
УДК 621.384.6

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБЛУЧЕНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ Kr, Xe, He НА УСКОРИТЕЛЕ ДЦ-60

**А.М. Темір^{1*}, И.А. Иванов^{1,2}, А.Д. Сапар^{1,2}, Е.О. Унгарбаев^{1,2}, Е.В. Бихерт¹, Б.С. Аманжулов¹,
А.С. Сейтбаев^{1,2}, И.К. Тлеубай¹**

¹ РГП «Институт ядерной физики» Агентства РК по атомной энергии, Алматы, Казахстан

² НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева», Астана, Казахстан

* E-mail для контактов: a.temir@inp.kz

В статье представлены результаты оптимизации режимов формирования низкоэнергетических ионных пучков Kr, Xe и He на ускорительном комплексе ДЦ-60, предназначенных для моделирования радиационных повреждений материалов. Выполнена модернизация электронно-циклотронного резонансного источника многозарядных ионов с заменой DECRIS-3 на DECRIS-3М, а также проведена оптимизация параметров ЭЦР-источника, системы инжекции, транспортировки и сканирования ионного пучка. Исследованы зарядовые состояния и интенсивности рабочих пучков, определены оптимальные режимы их формирования и обеспечено равномерное распределение плотности тока по поверхности мишени. Установлено, что средний ток пучка на мишени увеличился с 45 до 77 мкА для ионов He²⁺, с 13 до 26 мкА для Kr¹⁵⁺ и с 6 до 14 мкА для Xe²³⁺, что соответствует увеличению в 1,7, 2,0 и 2,3 раза соответственно. Полученные результаты позволяют сократить время достижения требуемого флюенса и повысить эффективность проведения экспериментов по моделированию радиационных повреждений материалов.

Ключевые слова: криптон, ксенон, гелий, низкие энергии, ускоритель.

1. ВВЕДЕНИЕ

В связи с высокой стоимостью и длительностью нейтронных экспериментов ионное облучение широко применяется в качестве эффективного лабораторного метода моделирования радиационных повреждений конструкционных материалов для ядерной энергетики [1]. Использование ускоренных ионных пучков позволяет воспроизводить основные процессы, сопровождающие нейтронное воздействие, включая образование каскадов атомных смещений, генерацию радиационных дефектов и имплантацию газообразных продуктов деления, при этом существенно сокращая время накопления повреждений [2]. Достоверность результатов такого моделирования во многом определяется стабильностью параметров ионного пучка, его интенсивностью, зарядовым состоянием и равномерностью распределения по поверхности облучаемой мишени.

Одной из установок, обеспечивающих проведение подобных исследований, является ускорительный комплекс тяжелых ионов ДЦ-60. Комплекс предназначен для ускорения положительно заряженных ионов с отношением массового числа к заряду $A/Z = 6-12$ до энергий 0,3-1,75 МэВ/нуклон и позволяет получать интенсивные пучки различных элементов для фундаментальных и прикладных исследований в области ядерной физики, материаловедения и радиационных технологий [3,4]. Источником многозарядных ионов комплекса является электронно-циклотронный резонансный источник DECRIS-3, формирующий пучки ионов в широком

диапазоне зарядовых состояний. После селекции требуемого отношения массы к заряду сформированный пучок может быть направлен как в циклотрон для дальнейшего ускорения, так и в низкоэнергетический канал для проведения экспериментов по исследованию радиационного воздействия на материалы.

В процессе многолетней эксплуатации комплекса было установлено, что воздействие высоких температур, плазмы и ионизирующего излучения приводит к постепенному ухудшению характеристик магнитной системы гексаполя ЭЦР-источника и, как следствие, к снижению эффективности формирования многозарядных ионных пучков. Необходимость модернизации источника была обоснована в работе [5], после чего ЭЦР-источник DECRIS-3 был заменен на модернизированную версию DECRIS-3М, обладающую улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Настоящая работа посвящена оптимизации параметров формирования низкоэнергетических пучков ионов Kr, Xe и He на ускорительном комплексе ДЦ-60 после модернизации ЭЦР-источника многозарядных ионов. Основное внимание уделено выбору оптимальных режимов работы ЭЦР-источника, систем инжекции, транспортировки и сканирования, обеспечивающих максимальную интенсивность и стабильность рабочих пучков. Выполнена количественная оценка эффективности модернизации и разработанных режимов, позволившая обосновать повышение среднего тока рабочих пучков и улучшение эксплуатационных характеристик ускорительного комплекса.

2. МЕТОДЫ

2.1 Плазменная очистка и подготовка ЭЦР-источника

Для очистки ионизационной камеры ЭЦР-источника и его внутренних металлических элементов от остаточных загрязнений и примесей проводилась плазменная обработка в аргоне (^{40}Ar). Схематическое изображение ЭЦР-источника представлено на рисунке 1. Плазменная обработка осуществлялась при мощности СВЧ-разряда порядка 350 Вт и поддерживалась в течение длительного времени. Данная процедура направлена на удаление остаточных газовых примесей и загрязнений с внутренних поверхностей плазменной камеры и элементов ЭЦР-источника, что способствовало снижению содержания посторонних примесей в плазме и улучшению условий формирования ионного пучка.

После плазменной очистки проводилась настройка ЭЦР-источника и анализ распределения ионов по зарядовым состояниям. На рисунке 2 представлено зарядовое распределение ионов аргона, полученное при настройке источника.

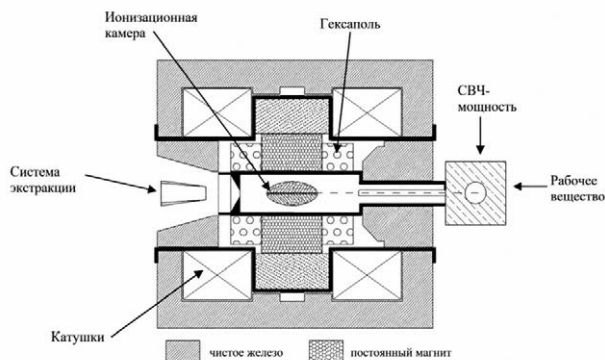


Рисунок 1. Схема ЭЦР-источника

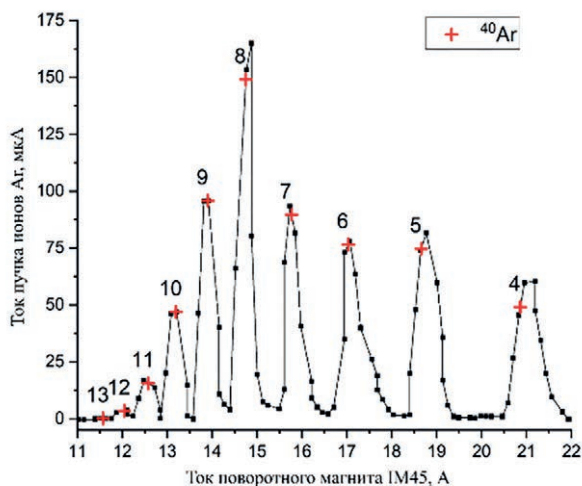
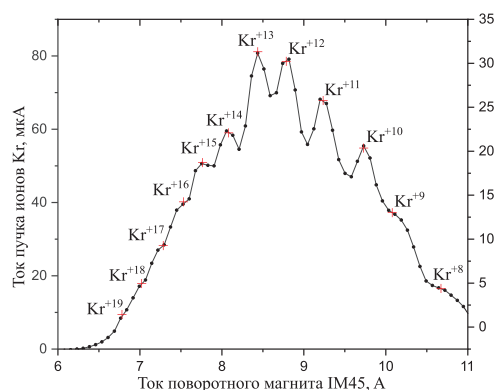


Рисунок 2. Зарядовое распределение ионов аргона

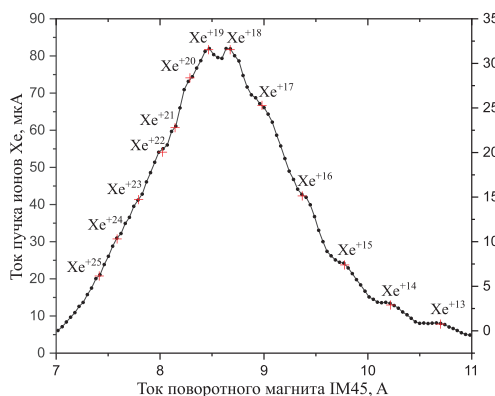
2.2 Настройка системы инжекции пучков ионов криптона, ксенона и гелия на ускорителе ДЦ-60

На следующем этапе работы проводилась оптимизация режимов формирования ионных пучков криптона (Kr), ксенона (Xe) и гелия (He). Целью данного этапа являлось получение стабильных ионных пучков требуемой интенсивности и зарядового состояния для последующего использования в экспериментах по ионному облучению материалов.

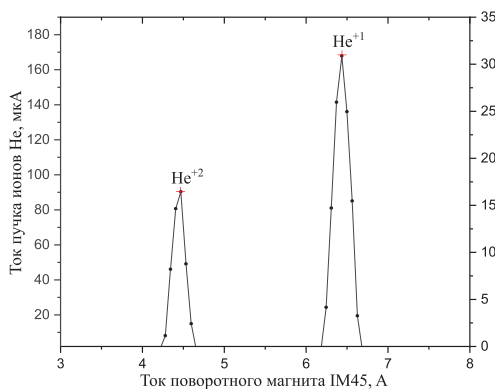
Для анализа сформированных пучков были получены спектры зарядовых состояний ионов криптона, ксенона и гелия, представленные на рисунке 3.



(а) спектр зарядовых состояний ионов криптона;



(б) спектр зарядовых состояний ионов ксенона;



(в) спектр зарядовых состояний ионов гелия

Рисунок 3. Зарядовое распределение ионов криптона, ксенона, гелия

Для ионов криптона и ксенона характерна сглаженная структура спектра зарядовых состояний, представленная на рисунках 3 (а) и 3 (б). Это обусловлено сложным изотопным составом данных элементов, включающим набор стабильных изотопов с различными массовыми числами, а также широким распределением ионов по зарядовым состояниям в плазме ЭЦР-источника. Вследствие этого снижается контраст между максимумами отдельных зарядовых состояний.

При этом выделение требуемого ионного пучка осуществлялось анализирующим поворотным магнитом IM45, предназначенным для селекции ионов по отношению массы к заряду A/Z . Настройка магнитного поля обеспечивала выделение необходимого зарядового состояния и подавление вклада соседних изотопных и зарядовых компонент в транспортируемом пучке. Основные параметры поворотного магнита IM45 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры поворотного магнита IM45

Параметр	Значение
Жёсткость пучка $B\rho$, Т·м	10.22×10^{-2}
Отношение массы к заряду (A/Z)	2–20
Ускоряющий потенциал (U), кВ	25
Угол поворота осевой траектории ϕ , град	45
Радиус осевой траектории ρ_0 , мм	400
Межполюсный зазор (q), мм	100
Расчётная индукция магнитного поля (B), Т	$0.27 \pm 1\%$
Неоднородность индукции поля в рабочей зоне ± 50 мм, $\Delta B/B$	$\leq \pm 1 \times 10^{-3}$
Угол торцевого скоса входного полюса ε_1 , град	$+12.00$
Угол торцевого скоса выходного полюса ε_2 , град	$+12.00$

В рамках исследования была выполнена настройка системы инжекции пучков ионов криптона, ксенона и гелия. Схема ЭЦР-источника, используемого для формирования ионных пучков, представлена на рисунке 1. В состав системы входят катушки магнитной конфигурации, система экстракции, СВЧ мощность, система подачи рабочего вещества, источник смещающего напряжения ($Bias$), вытягивающее напряжение HV ECR, обеспечивающие необходимые условия для генерации и стабилизации плазмы.

Была проведена настройка параметров СВЧ-волны: для криптона и ксенона она была установлена на уровне 350 Вт, а для гелия – 50 Вт, что обусловлено различиями в динамике плазменных процессов и обеспечило оптимальные условия для ионизации газов и формирования стабильной плазмы.

Для получения требуемых энергий ионов использовались различные зарядовые состояния при фиксированном ускоряющем напряжении 20 кВ: для криптона энергия 300 кэВ достигалась при зарядовом состоянии $+15$, для ксенона энергия 460 кэВ – при

$+23$, а для гелия энергия 40 кэВ – при $+2$. Выбор зарядовых состояний определялся соотношением $E=qU$ (где E – энергия иона, q – его электрический заряд, U – ускоряющее напряжение) и являлся компромиссом между требуемой энергией пучка, интенсивностью и стабильностью формирования ионов в ЭЦР-источнике.

Известно, что с увеличением зарядового состояния интенсивность ионов в спектре ЭЦР-источника существенно снижается вследствие уменьшения доли высокозарядных компонент в плазме. Поэтому использование более высоких зарядовых состояний, несмотря на возможность получения больших энергий, сопровождалось значительным уменьшением тока пучка и усложнением условий его транспортировки. В то же время применение более низких зарядовых состояний не обеспечивало достижения требуемых энергетических характеристик ионов при заданном ускоряющем напряжении.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКОВ ИОНОВ КРИПТОНА, КСЕНОНА И ГЕЛИЯ НА УСКОРИТЕЛЕ ДЦ-60

3.1 Формирование и транспортировка пучка

Для формирования и последующего вывода пучков ионов Kr, Xe и He использовалась система аксиальной инжекции, представленная на рисунке 4.

Система включает в себя последовательность соленоидов AS2, AS3 и AS4, обеспечивающих фокусировку и транспортировку пучка вдоль оси. Изменение траектории пучка, а также его пространственная селекция по зарядовому состоянию, осуществляются с использованием поворотных магнитов с углом отклонения 45° (AM45-1 и AM45-2) на рисунке 4.

Для коррекции траектории пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях применяются корректирующие катушки ACM2H, ACM2V, ACM3H и ACM3V. Дополнительно в системе установлены сканирующие устройства AVS и AHS, предназначенные для управления пространственным распределением пучка.

После прохождения поворотного магнита AM45-1 интенсивность пучка ионов Kr^{15+} составила 60,4 мкА, ионов Xe^{23+} – 34,33 мкА, а ионов He^{2+} – 119,82 мкА.

3.2 Оценка эффективности модернизации

Для оценки эффективности модернизации ЭЦР-источника DECRIS-3 и выполненной оптимизации режимов формирования, инжекции и транспортировки пучков проведено сравнение эксплуатационных характеристик ускорительного комплекса до и после модернизации. В качестве критерия использовали средний ток пучка, зарегистрированный на мишени при одинаковых энергетических режимах.

Эффективность выполненной модернизации подтверждается результатами эксплуатации ускорительного комплекса. Согласно данным журналов

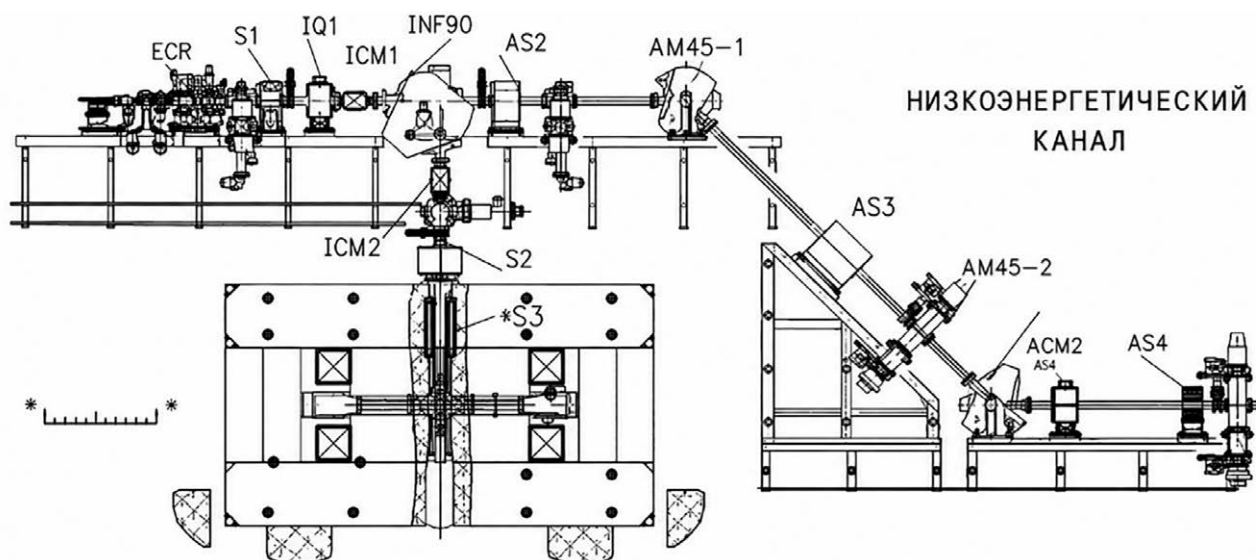


Рисунок 4. Конфигурация системы аксиального ввода ионных пучков криптона, ксенона и гелия на низкоэнергетическом канале ECR - источник ионов; IS1, IS2, IS3 - соленоидные магнитные линзы системы инжекции; IQ1 - квадрупольная линза; ICM1, ICM2 - корректирующие магниты системы инжекции; AS2, AS3, AS4 - соленоидные магнитные линзы системы аксиальной инжекции; AM45-1, AM45-2 - поворотные магниты с углом отклонения 45°; ACM2H, ACM2V, ACM3H, ACM3V — корректирующие магниты системы аксиальной инжекции; AVS и AHS — сканирующие устройства

работы ДЦ-60, после модернизации ЭЦР-источника DECRIS-3 до конфигурации DECRIS-3M и оптимизации режимов формирования, инжекции и транспортировки пучка средний ток ионов He^{2+} с энергией 40 кэВ увеличился с 45 до 77 мкА (в 1,7 раза), Kr^{15+} с энергией 300 кэВ – с 13 до 26 мкА (в 2 раза), а Xe^{23+} с энергией 460 кэВ – с 6 до 14 мкА (в 2,3 раза) по сравнению с показателями, зарегистрированными до модернизации.

Полученные результаты свидетельствуют о существенном повышении эффективности формирования и транспортировки многозарядных ионных пучков, что обеспечивает сокращение времени достижения, требуемого флюенса и повышение производительности экспериментов по ионному моделированию радиационных повреждений материалов.

Таблица 2. Сравнение средних токов ионных пучков на мишени до и после модернизации ЭЦР-источника: DECRIS-3 и DECRIS-3M

Ион	Энергия, кэВ	До модернизации (DECRIS-3), мкА	После модернизации (DECRIS-3M), мкА	Рост, раз
He^{2+}	40	45	77	1,71
Kr^{15+}	300	13	26	2
Xe^{23+}	460	6	14	2,33

3.3 Оптимизация системы сканирования

Низкоэнергетический канал оснащён профилометром АРМ – специализированным диагностическим прибором, предназначенным для мониторинга параметров ионного пучка. Профилометр, расположенный вблизи зоны облучения, обеспечивал контроль

пространственного положения, формы и направления пучка непосредственно перед его попаданием на мишень [6].

В процессе подготовки ионного пучка к облучению мишени перед её поверхностью использовались электромагнитные сканеры AVS и AHS, обеспечивающие формирование однородности распределения плотности тока пучка по поверхности мишени. Подбор токов в обмотках сканеров осуществлялся экспериментально для каждого типа ионов с целью достижения равномерного облучения рабочей области мишени [6].

Система сканирования обеспечивает облучение стационарной мишени размерами $80 \times 80 \text{ мм}^2$ с однородностью распределения частиц по облучаемой площади не хуже $\pm 5\%$ и с краевыми потерями пучка не более 20%.

Оптимальные параметры сканирования ионного пучка существенно зависят от вида рабочего газа. Для ионов криптона наилучшая однородность распределения плотности и требуемая степень развёртки достигаются при токах 0,9 А в горизонтальном и вертикальном направлении. В случае ксенона аналогичные характеристики обеспечиваются при токах 0,8 А по обоим направлениям. Для гелия оптимальные значения токов ниже и составляют 0,6 А в горизонтальном и вертикальном направлении. Различия в значениях токов обусловлено различиями в массе и энергии ионов, которые определяют условия, необходимые для обеспечения их равномерного распределения по поверхности мишени.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнена комплексная оптимизация режимов формирования низкоэнергетических ионных пучков He^{2+} , Kr^{15+} и Xe^{23+} на ускорительном комплексе ДЦ-60 после модернизации электронно-циклотронного резонансного источника многозарядных ионов с заменой DECRIS-3 на DECRIS-3М. Проведена настройка параметров ЭЦР-источника, системы инжекции, транспортировки и сканирования пучка, что позволило обеспечить стабильное формирование рабочих пучков и равномерное распределение плотности тока по поверхности мишени.

В результате проведенной модернизации и оптимизации средний ток пучка на мишени увеличился с 45 до 77 мкА для ионов He^{2+} , с 13 до 26 мкА для Kr^{15+} и с 6 до 14 мкА для Xe^{23+} , что соответствует увеличению в 1,7, 2,0 и 2,3 раза соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о повышении эффективности формирования и транспортировки многозарядных ионных пучков.

Повышение интенсивности рабочих пучков позволяет сократить время достижения требуемого флюенса при сохранении заданных параметров облучения, повысить производительность экспериментальных исследований и расширить возможности ускорительного комплекса ДЦ-60 для моделирования радиационных повреждений материалов, используемых в ядерной энергетике и радиационном материаловедении.

Данное исследование финансировалось Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН АР27511429 «Исследование радиационной стойкости карбидных покрытий под влиянием низкоэнергетического облучения ионами Kr, Xe, He»).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

1. Was G.S. Challenges to the use of ion irradiation for emulating reactor irradiation. Journal of Materials Research. 2015; 30(9):1158–1182. <https://doi.org/10.1557/jmr.2015.73>
2. Taller S., Van Coevering G., Wirth B.D., Was G.S. Predicting structural material degradation in advanced nuclear reactors with ion irradiation. Scientific Reports. 2021; 11:2949. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82512-w>
3. Темір А.М., Иванов И.А., Колобердин М.В., Сапар А.Д., Мустафин Д.А., Унгарбаев Е.О., Бихерт Е.В., Аманжулов Б.С., Сейтбаев А.С., Сембаев С.С., Тлеубай И.К. Оптимизация параметров ускорителя ДЦ-60 для облучения ПЭТФ-плёнок тяжёлыми ионами Kr. Вестник НЯЦ РК. 2025; (2):165–173.
4. Gikal B., Dmitriev S., Apel P., Bogomolov S., Borisov O., Buzmakov V., Gulbekyan G., Ivanenko I., Ivanov O., Itkis M., Kazarinov N., Kalagin I., Kolesov I., Papash A., Paschenko S., Tikhomirov A., Khabarov M. DC-60 heavy ion cyclotron complex: The first beams and project parameters. Instruments and Experimental Techniques. 2008; 51(5):642–644. <https://doi.org/10.1134/S1547477108070248>
5. Иванов И., Курахмедов А., Самбаев Е., Здоровец М., Логинов В., Богомоллов С., Бондарченко А., Колобердин М., Сапар А., Унгарбаев Е., Темір А., Мустафин Д., Абдугалимов, Г. Modernization of ECR-source DECRIS-3. Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Physics. Astronomy Series. 2022; 134(1):29–36.
6. Иванов И.А., Колобердин М.В., Курахмедов А.Е., Сапар А.Д., Мустафин Д.А., Темір А.М., Унгарбаев Е.О., Бихерт Е.В., Аманжулов Б.С., Сейтбаев А.С., Сембаев С.С., Тлеубай И.К., Здоровец М.В. ПОЛУЧЕНИЕ Kr^{15+} с энергией 1.75 МэВ/нуклон на ускорителе тяжёлых ионов. Журнал ядерного общества Казахстана. 2024; (1(64)):78–90.

ДЦ-60 ҮДЕТКІШІНДЕ ТӨМЕН ЭНЕРГИЯЛЫ Kr, Xe, He ИОНДАРЫМЕН СӘУЛЕЛЕНДІРУ РЕЖИМДЕРІНІҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

**Ә.М. Темір^{1*}, И.А. Иванов^{1,2}, Ә.Д. Сапар^{1,2}, Е.О. Унгарбаев^{1,2},
Е.В. Бихерт¹, Б.С. Аманжулов¹, А.С. Сейтбаев^{1,2}, И.К. Тлеубай¹**

¹ ҚР Атом энергиясы агенттігінің «Ядролық физика институты» РМҚ, Алматы, Қазақстан

² «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан

* Байланыс үшін e-mail: a.temir@inp.kz

Мақалада материалдардағы радиациялық зақымдануларды модельдеуге арналған ДЦ-60 үдеткіш кешенінде төмен энергиялы Kr, Xe және He ион шоқтарын қалыптастыру режимдерін оңтайландыру нәтижелері ұсынылған. DECRIS-3 электрондық-циклотрондық резонанстық (ЭЦР) көп зарядты иондар көзі DECRIS-3М жаңартылған нұсқасына ауыстырылып, модернизацияланды. Сонымен қатар ЭЦР көзінің, ион шоғын инжекциялау, тасымалдау және сканерлеу жүйелерінің жұмыс параметрлері оңтайландырылды. Жұмысшы ион шоқтарының зарядтық күйлері мен қарқындылығы зерттеліп, оларды қалыптастырудың оңтайлы режимдері анықталды және нысана беті бойынша шоқ тоғы тығыздығының біркелкі таралуы қамтамасыз етілді. Зерттеу нәтижесінде нысанадағы орташа шоқ тоғы He^{2+} иондары үшін 45-тен 77 мкА-ға, Kr^{15+} иондары үшін 13-тен 26 мкА-ға, ал Xe^{23+} иондары үшін 6-дан 14 мкА-ға дейін артқаны анықталды, бұл сәйкесінше 1,7, 2,0 және 2,3 есе өсімге сәйкес келеді. Алынған нәтижелер қажетті флюенске жету уақытын қысқартуға және материалдардағы радиациялық зақымдануларды модельдеу бойынша эксперименттердің тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: криптон, ксенон, гелий, төмен энергиялар, үдеткіш.

OPTIMIZATION OF IRRADIATION PARAMETERS WITH LOW-ENERGY Kr, Xe, He IONS
AT THE DC-60 ACCELERATOR

A.M. Temir^{1*}, I.A. Ivanov^{1,2}, A.D. Sapar^{1,2}, E.O. Ungarbayev^{1,2}, E.V. Bikhert¹, B.S. Amanzholov¹,
A.S. Seitbayev^{1,2}, I.K. Tleubay¹

¹RSE “Institute of Nuclear Physics” of the Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, Almaty, Kazakhstan

²NJSC “L.N. Gumilyov Eurasian National University”, Astana, Kazakhstan

* E-mail for contacts: a.temir@inp.kz

This paper presents the results of optimizing the operating modes for the formation of low-energy Kr, Xe, and He ion beams at the DC-60 accelerator complex intended for simulation of radiation damage in materials. The electron cyclotron resonance (ECR) source of highly charged ions was upgraded by replacing the DECRIS-3 source with the modernized DECRIS-3M. In addition, the operating parameters of the ECR ion source, beam injection, transport, and scanning systems were optimized. The charge-state distributions and beam intensities were investigated; optimal beam formation conditions were determined, and a uniform beam current density distribution over the target surface was achieved. The average beam current on the target increased from 45 to 77 μA for He²⁺ ions, from 13 to 26 μA for Kr¹⁵⁺ ions, and from 6 to 14 μA for Xe²³⁺ ions, corresponding to increases by factors of 1.7, 2.0, and 2.3, respectively. The obtained results reduce the time required to achieve the desired ion fluence and improve the efficiency of radiation damage simulation experiments in materials.

Keywords: krypton, xenon, helium, low-energy ions, accelerator.