

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-2-110-117>

УДК 29.29.31

## РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ С ФОЛЬГАМИ МИШЕННОГО УСТРОЙСТВА ЦИКЛОТРОНА

А. Р. Хажидинова<sup>1\*</sup>, А. С. Хажидинов<sup>2</sup>, О. А. Степанова<sup>1</sup>, М. В. Ермоленко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Некоммерческое акционерное общество «Шәкарім университет», Семей, Казахстан

<sup>2</sup> Коммунальное государственное предприятие на праве хозяйственного ведения «Центр ядерной медицины и онкологии» управления здравоохранения области Абай, Семей, Казахстан

\* E-mail для контактов: khazhidinova1991@mail.ru

В статье исследован процесс взаимодействия протонов с фольгами держателя мишени циклотрона. Исследование проводилось с помощью расчетной программы SRIM, в которой была создана трехслойная модель держателя фольг мишени циклотрона. Мишень бомбардировалась протонами с энергией 18 МэВ при нормальном падении, количество протонов равнялось 300102. В расчете не учитывались ядерные реакции. В результате проведенных исследований установлено, что на 300100 протонов, пролетевших через всю модель, приходится 2 обратно рассеянных протона. Представлены результаты распределения протонов вдоль расчетной модели и в поперечном сечении в конце модели. Результаты проведенных исследований позволяют оценить пространственное и энергетическое распределение протонов в держателе фольг мишени циклотрона, что можно использовать для оптимизации процесса облучения обогащенной воды операторами циклотрона. Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований, направленных на оценку степени усталости фольг мишени и разработку рекомендаций по частоте их замены при техническом обслуживании.

**Ключевые слова:** циклотрон, мишень, протоны, пучок, фольги, распределение протонов, вакансии.

### ВВЕДЕНИЕ

Для исследований онкологических заболеваний и производства лекарственных препаратов используются различные типы ускорителей частиц. В «Центре ядерной медицины и онкологии» города Семей имеется медицинский циклотрон [1].

Медицинский циклотрон представляет собой систему наработки радиоизотопов, состоящую из ускорителя и спектра мишеней. Циклотрон разработан для производства и ускорения отрицательно заряженных ионов, с фиксированной энергией пучка, обеспечивающий ускорение отрицательно заряженных ионов до 18 МэВ, которые при прохождении через экстрактор отрываются от своих электронов, а затем уже протоны попадают в мишень [1].

Стандартной мишенью для циклотрона является жидкостная мишень для производства изотопа  $^{18}\text{F}$ . В мишень загружается обогащенная вода по кислороду  $^{18}\text{O}$ , пучок протонов бомбардирует обогащенную воду и в результате ядерной реакции  $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$  образуется изотоп  $^{18}\text{F}$ , который по капиллярам транспортируется из мишени циклотрона в горячую камеру лаборатории для дальнейшего синтеза и расфасовки радиофармпрепарата. Мишень состоит из следующих основных узлов: коллиматор, держатель фольг, вставки мишени, корпус мишени. При этом держатель фольг включает в себя титановую фольгу, которая отделяет мишень от вакуума, и фольгу Navar, которая удерживает облучаемую среду внутри мишени [1].

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью всестороннего понимания физических процессов, происходящих при взаимодействии протонного пучка с конструктивными элемен-

тами мишени медицинского циклотронного ускорителя, в частности – с фольгами держателя. Стоит отметить также особую значимость исследований таких процессов, как ионизация, возбуждение атомов, радиационные повреждения и тепловыделение, играющих ключевую роль в надежности, эффективности и безопасности работы ускорителей при производстве радионуклидов.

Целью данной работы является исследование процесса облучения фольг мишени циклотрона на основании проведения расчетного анализа взаимодействия протонов с держателем фольг мишени в программе SRIM.

Прикладная значимость работы определяется её вкладом в оптимизацию процессов, связанных с получением медицинских радионуклидов, применяемых в диагностике онкологических заболеваний. Особенно это актуально для Республики Казахстан, где функционируют центры ядерной медицины, оснащенные циклотронными установками, а также учитывая историческое наследие, связанное с деятельностью Семипалатинского испытательного полигона и его последствиями для здоровья населения.

Для анализа пространственного и энергетического распределения протонов в модели держателя фольг мишени циклотрона использовалась подпрограмма TRIM. Подпрограмма TRIM содержится в программах под названием SRIM-2013 (The Stopping and Range of Ions in Matter) [2].

Программа SRIM достаточно популярна [3–6], используется для быстрого расчета производства вакансий, воздействия ионного облучения, моделирования повреждений, вызванных ионами и другое [7–

8]. Несмотря на большое количество работ в этом направлении, крайне мало расчетов распределения ионов при прохождении через мишень действующего циклотрона и анализа качественных характеристик параметров протонного пучка, что подчеркивает особую ценность настоящей статьи.

### Методы

Используемая в настоящей работе подпрограмма TRIM – это группа программ, которые вычисляют остановку и пробег ионов ( $10 \text{ эВ} - 2 \text{ ГэВ/а.е.м.}$ ) в веществе, используя квантово-механическую обработку столкновений ионов с атомами (движущийся атом именуется «ионом», а все целевые атомы – «атомами»). Этот расчет становится очень эффективным благодаря использованию статистических алгоритмов, которые позволяют иону совершать скачки между рассчитанными столкновениями, а затем усредняют результаты столкновений по промежуточному зазору [9–10]. Во время столкновений ион и атом имеют экранированное кулоновское столкновение, включая обменные и корреляционные взаимодействия между перекрывающимися электронными оболочками.

Ион имеет дальнедействующие взаимодействия, создающие электронные возбуждения и плазмоны внутри мишени. Они описываются путем включения описания коллективной электронной структуры мишени и структуры межатомных связей при настройке расчета. Состояние заряда иона внутри мишени описывается с помощью концепции эффективного заряда, которая включает в себя зависящее от скорости состояние заряда и экранирование на больших расстояниях из-за коллективного электронного моря мишени [2].

Программа SRIM предполагает, что в конечном распределении ионов есть цилиндрическая симметрия. Предполагаемая цилиндрическая ось перпендикулярна поверхности мишени в точке удара ионов [2].

Научная новизна исследования заключается в проведении расчётного анализа взаимодействия про-

тонного пучка с конструктивными элементами мишени медицинского циклотронного ускорителя с использованием программного пакета SRIM применительно к конкретным условиям эксплуатации в Казахстане. Исследование ориентировано на оптимизацию работы циклотронной установки с учётом ее специфических медицинских и технологических потребностей.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### Расчет распределения ионов при прохождении через трехслойную модель держателя фольг мишени циклотрона

На рисунке 1 представлена упрощенная схема мишени циклотрона. Для проведения расчета распределения ионов в программе SRIM смоделирована трехслойная модель держателя фольг, включающая три слоя: первый слой – титановая фольга толщиной  $12,5 \text{ мкм}$ ; второй слой – гелиевый зазор шириной  $8 \text{ мм}$ ; третий слой – фольга Havar толщиной  $35 \text{ мкм}$ . Состав фольги Havar: Co 42%; Cr 19,5%; Ni 12,7%; W 2,7%; Mo 2,2%; Mn 1,6%; C 0,2%; Fe 19,1% [11].

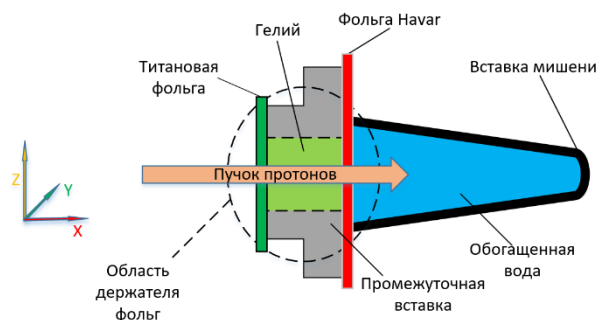


Рисунок 1. Упрощенная схема мишени циклотрона

Входные данные для расчета распределения ионов в программе SRIM сведены в таблицу 1. Стоит отметить, что программа SRIM не учитывает ядерные реакции протонов с веществом. Количество расчетных ионов было принято равным 300102, энергия налетающего протона равна  $18 \text{ МэВ}$ .

Таблица 1. Входные данные для расчета распределения протонов в программе SRIM

| № слоя                           | Название слоя    | Ширина (А)        | Плотность (г/см³) | Co     | Cr    | Ni     | W      | Mo     | Mn     | C      | Fe     | Ti   | He | Solid/Gas |
|----------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|----|-----------|
| Атомный вес                      |                  |                   |                   |        |       |        |        |        |        |        |        |      |    |           |
| 1                                | Титановая фольга | $12,5 \cdot 10^4$ | 4,519             | 0      | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 1    | 0  | Solid     |
| 2                                | Газ гелий        | $8 \cdot 10^7$    | 0,000268          | 0      | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0    | 1  | Gas       |
| 3                                | Фольга Havar     | $35 \cdot 10^4$   | 8,3               | 0,4119 | 0,217 | 0,1252 | 0,0085 | 0,0132 | 0,0168 | 0,0096 | 0,1977 | 0    | 0  | Solid     |
| Энергия связи решетки (эВ)       |                  |                   |                   |        |       |        |        |        |        |        |        |      |    |           |
|                                  |                  |                   |                   | 2,2    | 2,2   | 2,2    | 2,2    | 2,2    | 2,2    | 2,2    | 2,6    | 2,2  |    |           |
| Поверхностная энергия связи (эВ) |                  |                   |                   |        |       |        |        |        |        |        |        |      |    |           |
|                                  |                  |                   |                   | 4,43   | 4,12  | 4,46   | 3,1    | 6,83   | 2,98   | 7,41   | 7,5    | 4,89 |    |           |
| Энергия смещения (эВ)            |                  |                   |                   |        |       |        |        |        |        |        |        |      |    |           |
|                                  |                  |                   |                   | 22     | 22    | 22     | 22     | 22     | 22     | 22     | 21     | 22   |    |           |

### Результаты расчета

В результате проведенных расчетов получено распределение протонов в трехслойной модели держателя фольг. На рисунке 2 представлено вероятностное распределение протонов вдоль расчетной модели. На рисунке 3 показано вероятностное распределение протонов в поперечном сечении в конце модели.

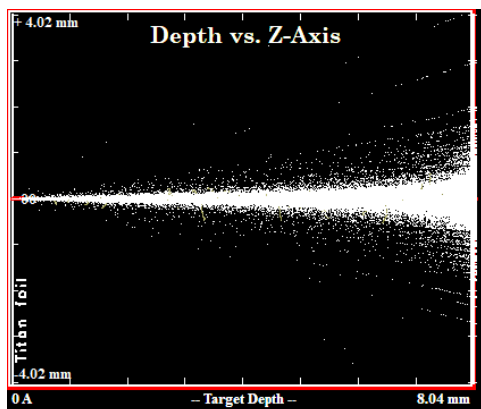


Рисунок 2. Распределение протонов вдоль расчетной модели

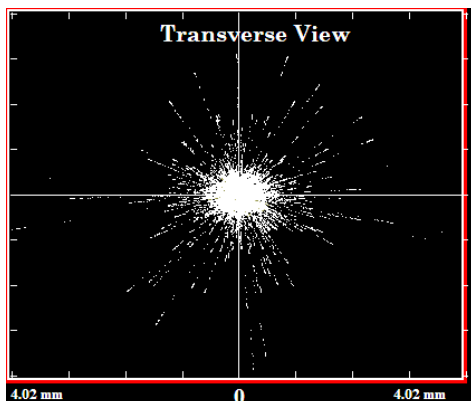


Рисунок 3. Распределение протонов в поперечном сечении в конце модели

Из анализа рисунков 2 и 3 видно, что основная часть протонов достигает края модели, также заметно расширение пучка вследствие взаимодействия протонов с атомами вещества. Расчетное распределение частиц в модели представлено в таблице 2.

Таблица 2. Расчетное распределение частиц в модели

| Тип                           | Количество |
|-------------------------------|------------|
| Ионы, прошедшие сквозь модель | 300100     |
| Ионы, рассеянные обратно      | 2          |
| Вакансии / ионы               | 5,2        |

Анализ данных таблицы 2 показал, что на 300100 протонов, пролетевших через всю модель, приходится 2 обратно рассеянных протона.

Если учесть диаметр проходного сечения вставки мишени, равной 1,4 мм, и пренебречь потерей прото-

нов, которые налетают на промежуточную вставку, то существует небольшая доля протонов, которые рассеиваются и не попадают в обогащенную воду, как показано на рисунке 4.

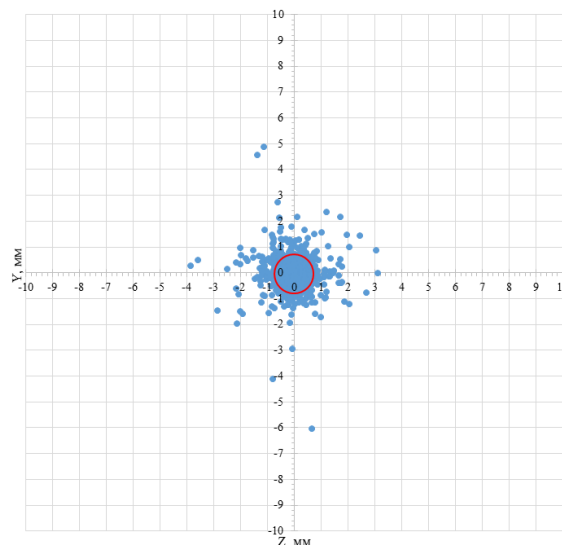


Рисунок 4. Распределение протонов в поперечном сечении на выходе модели

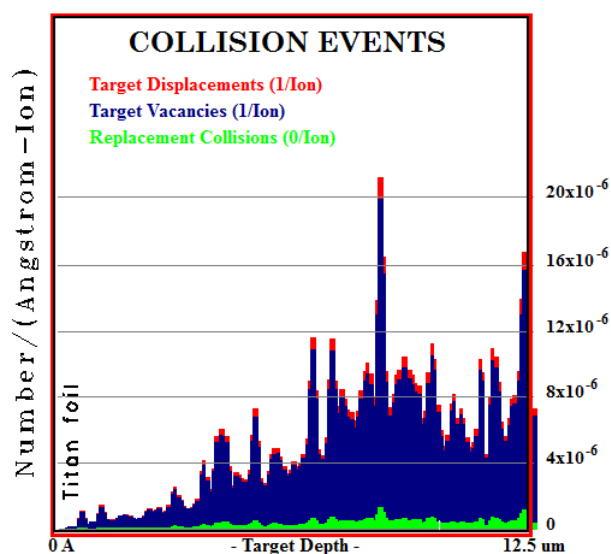
Из анализа рисунка 4 следует, что 99,918% количества протонов, пролетевших через всю модель, попадают в зону с диаметром 1,4 мм, в которой заключена обогащенная вода, а остальное количество 0,082% протонов рассеиваются и вылетают за пределы.

При этом количество образовавшихся вакансии к числу протонов равно 5,2, согласно таблице 2, то есть происходит процесс перемещения атома отдачи со своего исходного места. Когда атом отдачи останавливается и не является замещающим атомом, он становится междоузлием. Их можно суммировать следующим образом: вакансии равно сумме междоузлий и атомов, которые покидают целевой объем.

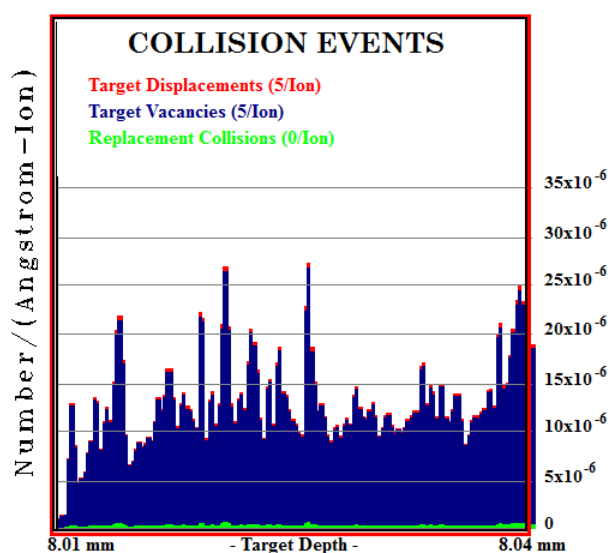
По результатам расчета следует, что число вакансии равно числу смещений атомов, а число замещений атомов модели равно 0.

На рисунке 5 показано распределение вакансии вдоль фольг расчетной модели.

Из рисунка 5 следует, что 88,46% вакансии сосредоточено в фольге Navar, а остальные 11,54% приходятся на титановую фольгу. Из результатов видно, что первой деградирует фольга Navar и разгерметизация мишени происходит именно с разрыва фольги Navar, также этому способствует высокое давление, температура и коррозия со стороны обогащенной воды. Количество вакансий, образующихся в фольгах, напрямую зависит от интегрального тока пучка протонов. Образующиеся вакансии объединяются и приводят к появлению микропустот (микротрещин), что сказывается на сроке эксплуатации фольг, и, соответственно, существует предельный интегральный ток пучка, при котором вероятность разрыва фольг становится высокой.



а) титановая фольга

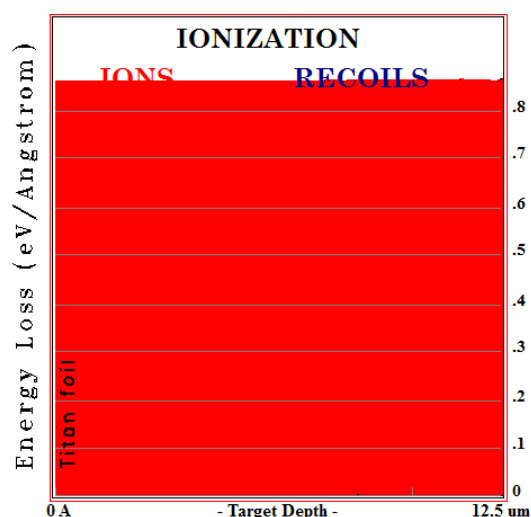


б) фольга Navar

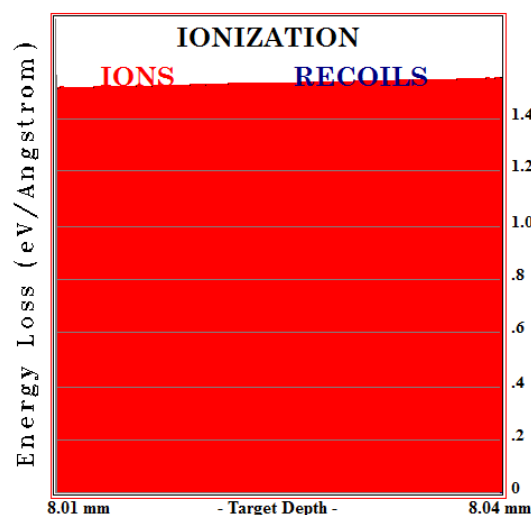
Рисунок 5. Распределение вакансии в фольгах расчетной модели

Результаты расчета потери энергии частиц показывают, что потери энергии протонов и атомов отдачи на ионизацию (электронные потери энергии) составляют 99,96% и 0,01% соответственно. При этом потери энергии ионов и атомов отдачи на фонах мишени (потери энергии, передаваемой кристаллической решетке) равны 0,01% и 0,02% соответственно.

На рисунке 6 приведено распределение потери энергии протонов и атомов отдачи на ионизацию вдоль фольг расчетной модели. Видно, что мгновенная электронная потеря энергии протона на атомах титановой фольги равна в среднем 0,858 эВ/А, а на атомах фольги Navar равна в среднем 1,526 эВ/А. Потери энергии на ионизацию у протонов в  $10^4$  раз больше, чем у атомов отдачи.



а) титановая фольга



б) фольга Navar

Рисунок 6. Распределение потерь энергии протонов и атомов отдачи на ионизацию вдоль фольг расчетной модели

На рисунке 7 приведено распределение потери энергии протонов и атомов отдачи на фонах вдоль фольг расчетной модели. Из рисунка видно, что потери энергии на фонах преобладают у атомов отдачи по сравнению с протонами в 2,59 и 3,39 раза в титановой и фольге Navar соответственно.

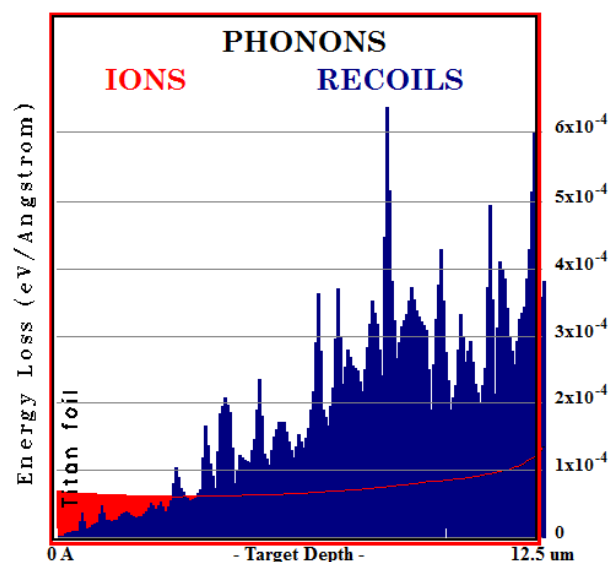
На рисунке 8 показано распределение потери энергии протонов на атомах отдачи фольг расчетной модели.

Из рисунка 8 видно, что потери энергии протонов на атомах отдачи в фольге Navar в 2,03 раза больше, чем в титановой фольге.

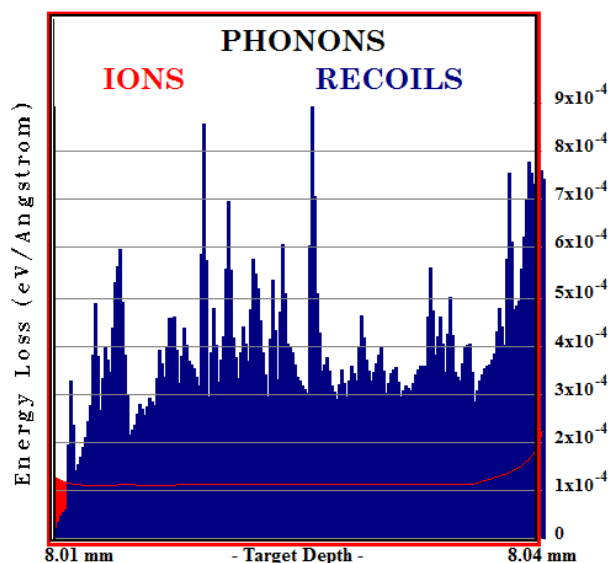
Программа TRIM использует энергию связи поверхности мишени (SBE) для определения того, имеет ли отскакивающий атом мишени достаточно энергии, чтобы покинуть твердое тело, или будет ли он удерживаться энергией связи поверхности мишени. На рисунке 9 приведен интегральный график

распыления атомов. Из графика видно, что энергия атомов отдачи не достигает порога энергии связи поверхности, равное примерно 4,6 эВ, что свидетельствует об отсутствии распыленных атомов.

Результаты расчета потери энергии протона при прохождении через титановую фольгу, гелиевый зазор и фольгу Navar в программе SRIM представлены в таблице 3.

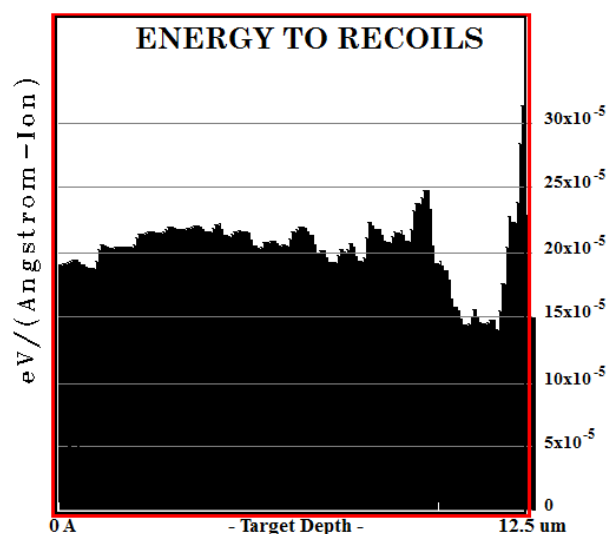


а) титановая фольга

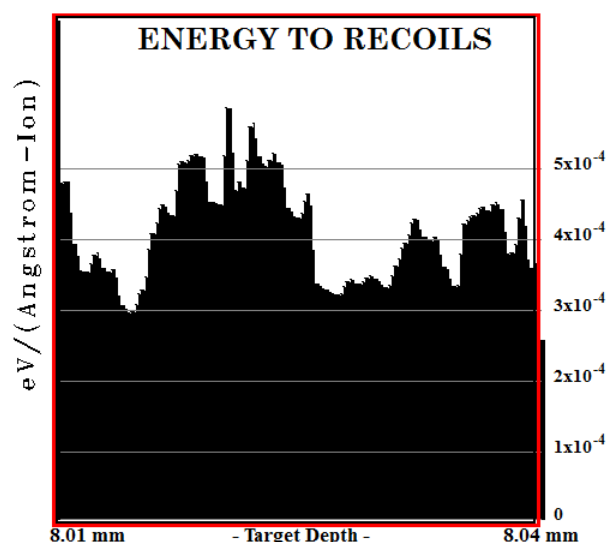


б) фольга Navar

Рисунок 7. Распределение потерь энергии протонов и атомов отдачи на фонах вдоль фольг расчетной модели



а) титановая фольга



б) фольга Navar

Рисунок 8. Распределение потери энергии протонов на атомах отдачи фольг расчетной модели

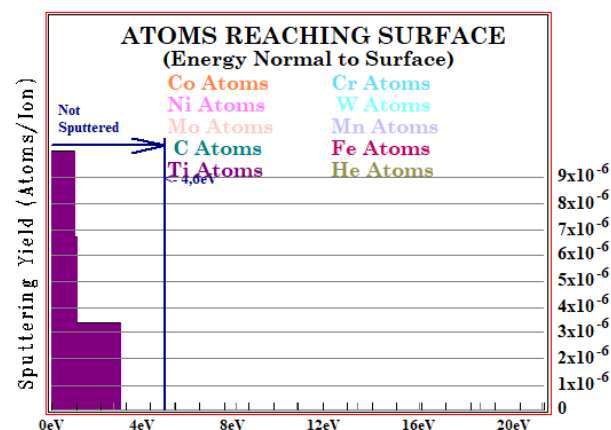


Рисунок 9. Интегральный график распыления атомов

Таблица 3. Результаты расчета потери энергии протона

| Наименование                                                                                      | Значение |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Начальная энергия протона $E_0$ , МэВ                                                             | 18,00    |
| Тормозная способность титановой фольги для протона, кэВ/мкм                                       | 8,55     |
| Потеря энергии протона при прохождении титановой фольги, кэВ                                      | 106,94   |
| Энергия протона после прохождения титановой фольги, кэВ                                           | 17893,06 |
| Тормозная способность гелия для протона, кэВ/м                                                    | 755,35   |
| Потеря энергии протона при прохождении гелия, кэВ                                                 | 6,04     |
| Энергия протона после прохождения фольги Navar и гелиевого зазора, кэВ                            | 17887,02 |
| Тормозная способность фольги Navar для протона, кэВ/мкм                                           | 15,08    |
| Потеря энергии протона при прохождении фольги Navar, кэВ                                          | 527,69   |
| Потеря энергии протона при прохождении через титановую фольгу, гелиевый зазор и фольгу Navar, кэВ | 640,67   |
| Энергия протона после прохождения всех слоев, кэВ                                                 | 17359,33 |

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований смоделирована трехслойная модель держателя фольг мишени циклотрона, которая бомбардировалась протонами с энергией 18 МэВ при нормальном падении, количество протонов равнялось 300102. В расчете не учитывались ядерные реакции.

Из анализа результатов расчета следует, что на 300100 протонов, пролетевших через всю модель, приходится 2 обратно рассеянных протона.

Наблюдается расширение пучка протонов вследствие их взаимодействия с веществом модели, при котором 99,918% количества протонов, пролетевших через всю модель, попадают в зону  $\varnothing$  1,4 мм, в которой заключена обогащенная вода, а остальные 0,082% протонов рассеиваются и вылетают за ее пределы, т. е. не участвуют в дальнейших ядерных реакциях в обогащенной воде.

Из анализа потери энергии частиц следует, что потери энергии протонов и атомов отдачи на ионизацию составляют 99,96% и 0,01% соответственно. Также потери энергии протонов и атомов отдачи на фонах модели равны 0,01% и 0,02% соответственно. Мгновенная электронная потеря энергии протона на атомах титановой фольги равна в среднем 0,858 эВ/А, на атомах фольги Navar равна в среднем 1,526 эВ/А. Потери энергии на ионизацию у протонов больше в  $10^4$  раз чем у атомов отдачи.

Потери энергии на фонах преобладают у атомов отдачи по сравнению с протонами в 2,59 и 3,39 раза в титановой и фольге Navar соответственно.

Потеря энергии протонов на атомах отдачи в фольге Navar в 2,03 раза больше, чем в титановой фольге.

Протон при прохождении через всю расчетную модель теряет в среднем 640,67 кэВ (в титановой фольге 106,94 кэВ, в гелиевом зазоре 6,04 кэВ, в

фольге Navar 527,69 кэВ) и энергия протона на выходе из модели составляет около 17359,33 кэВ.

Отношение количества образовавшихся вакансий в материале к числу протонов равно 5,2, количество распыленных атомов равно 0, количество замещённых атомов модели равно 0. Число вакансий в фольге Navar составляет 88,46% от общего количества, а на титановую фольгу приходится 11,54%. Из результатов видно, что первой деградирует фольга Navar и разгерметизация мишени происходит именно с разрыва фольги Navar, также этому способствует высокое давление, температура и коррозия со стороны обогащенной воды. Количество вакансий, образующихся в фольгах, напрямую зависит от интегрального тока пучка протонов. Образующиеся вакансии объединяются и приводят к появлению микропустот (микротрещин), что сказывается на сроке эксплуатации фольг, и, соответственно, существует предельный интегральный ток пучка, при котором вероятность разрыва фольг становится высоким.

Энергия атомов отдачи не достигает порога энергии связи поверхности, равного примерно 4,6 эВ, что свидетельствует об отсутствии распыленных атомов на 300102 протонов.

Моделирование в программе SRIM позволило лучше понять процессы, протекающие внутри держателя фольг во время облучения, оценить необходимость внесения корректировок в процессе облучения мишени. Результаты расчета позволяют проанализировать пространственное и энергетическое распределение протонов в держателе фольг мишени циклотрона, что может быть использовано операторами циклотрона для оптимизации процесса облучения обогащенной воды. Кроме того, полученные качественные характеристики параметров протонного пучка будут полезны для оценки степени усталости фольг мишени, что влияет на частоту замены фольг при техническом обслуживании.

### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. КГП на ПХВ «Центр ядерной медицины и онкологии» [Электронный ресурс] / Управление здравоохранения области Абай. – Режим доступа: <https://semeyonco.kz/> (дата обращения: 07.03.2025). [KGP na PKhV “Centr yadernoy meditsiny i onkologii” [Electronic resource] / Health Department of Abai Region. – Available at: <https://semeyonco.kz> (accessed 07 March 2025)]
2. The Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) [Electronic resource]. – Available at: <http://www.srim.org/> (accessed 09 March 2025).
3. Sun Y., Diao S.Z., Liu P.P., Zhan Q., Wan F.R. Anomalies in the calculation of dpa by using damage energy method based on full-cascades option of SRIM // Annals of Nuclear Energy. – 2023. – Vol. 183. – Article ID: 109667. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109667>
4. Osmani N., Benkharfia H., Saad D. Neutron-induced damage simulations using MCNP6 and SRIM codes: Beyond neutron transmutation doping of silicon // Annals

- of Nuclear Energy. – 2023. – Vol. 187. – Article ID: 109795. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.109795>
5. Subedi B., Paudel J., Lamichhane T.R. Gamma-ray, fast neutron and ion shielding characteristics of low-density and high-entropy Mg–Al–Ti–V–Cr–Fe–Zr–Nb alloy systems using Phy-X/PSD and SRIM programs // Heliyon. – 2023. – Vol. 9, Issue 7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17725>
  6. Lin Y., Zinkle S.J., Ortiz C.J., Crocombette J., Webb R., Stoller R.E. Predicting displacement damage for ion irradiation: Origin of the overestimation of vacancy production in SRIM full-cascade calculations // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2023. – Vol. 27, Issue 6. – Article ID: 101120. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2023.101120>
  7. Agarwal S., Lin Y., Li C., Stoller R.E., Zinkle S.J. On the use of SRIM for calculating vacancy production: Quick calculation and full-cascade options // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2021. – Vol. 503. – C. 11–29. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.06.018>
  8. Mitsi E., Koutsomitis K., Apostolopoulos G. On the use of SRIM for calculating arc-dpa exposure // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2023. – Vol. 545. – Article ID: 165145. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2023.165145>
  9. Nath D., Das R. Surface and displacement damage engineering on CdSe nanocrystalline thin film by swift heavy Ag ions: A theoretical investigation by SRIM/TRIM package // Vacuum. – 2021. – Vol. 190. – Article ID: 110293. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110293>
  10. Gurbich A.F., Prusachenko P.S., Bobrovskiy T.L., Bokhovko M.V. On the SRIM prediction of ranges for Ni ions // Applied Radiation and Isotopes. – 2025. – Vol. 215. – Article ID: 111590. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2024.111590>
  11. Cyclotron produced radionuclides: operation and maintenance gas and liquid targets [Электронный ресурс]. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012. – 24 см. — (IAEA Radioisotopes and Radiopharmaceuticals, ISSN 2077–6462; No. 4). – STI/PUB/1563. – ISBN 978–92–0–130710–1. – Available at: <https://www.iaea.org/> (accessed 03 February 2025).

## ЦИКЛОТРОННЫМ МИШЕНЬ ҚҰРЫЛҒЫСЫ ФОЛЬГАЛАРЫНЫҢ ПРОТОНДАРМЕН ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУІН ЕСЕПТІК ЗЕРТТЕУ

**А. Р. Хажидинова<sup>1\*</sup>, А. С. Хажидинов<sup>2</sup>, О. А. Степанова<sup>1</sup>, М. В. Ермоленко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> «Шәкәрім университеті» Коммерциялық емес акционерлік қоғамы, Семей, Қазақстан  
<sup>2</sup> Абай облысы денсаулық сақтау басқармасының «Ядролық медицина және онкология орталығы»  
 шаруашылық жүргізу құқығындағы коммуналдық мемлекеттік кәсіпорны, Семей, Қазақстан

\* Байланыс үшін E-mail: khazhidinova1991@mail.ru

Жұмыста циклотронның мишень ұстаушы фольгалардың протондармен өзара әрекеттесуі зерттелді. Зерттеу SRIM есептеу бағдарлама көмегімен жүргізілді, онда циклотронның мишень ұстаушы фольгаларының үш қабатты моделі құрылды. Мишень 18 МэВ қуатылығы нормалды бағытталған протондармен атылды, протондар саны 300102. Есепте ядролық реакциялар ескерілмеген. Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде 300100 бүкіл модель арқылы ұшқан протондарға 2 кері таратылған протон бар болғаны анықталды. Есептеу модель бойымен және модельдің сонында көлденең қимасында протондардың таралғанын нәтижелері ұсынылды. Жүргізілген зерттеулер нәтижелері циклотронның мишень ұстаушы фольгаларында протондардың кеңістік және энергетикалық таралуын бағалауға мүмкіндік береді. Ол циклотрон операторларымен өткізілетін құнарландырылған суды сәулелену процесін оңтайландыру үшін пайдалануға болады. Алынған нәтижелер фольгалардың шаршау дәрежесін бағалау және техникалық қызмет көрсету кезінде оларды ауыстыру жиілігі бойынша ұсыныстар әзірлеуге бағытталған келешек зерттеулердің негізі бола алады.

**Түйін сөздер:** циклотрон, мишень, протондар, протон сәулесі, фольгалар, протонның таралуы, бос орындар.



**CALCULATED STUDY OF PROTON INTERACTION WITH FOILS  
OF THE CYCLOTRON TARGET DEVICE**

**A. R. Khazhidinova<sup>1\*</sup>, A. S. Khazhidinov<sup>2</sup>, O. A. Stepanova<sup>1</sup>, M. V. Yermolenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Non-profit joint-stock company “Shakarim University”, Semey, Kazakhstan*

<sup>2</sup> *“Center of Nuclear Medicine and Oncology” Department of Healthcare of Abai Region, Semey, Kazakhstan*

*\* E-mail for contacts: khazhidinova1991@mail.ru*

The article studies the process of interaction of protons with the foils of the cyclotron target holder. The study was conducted using the SRIM calculation program, in which a three-layer model of the cyclotron target foil holder was created. The target was bombarded with 18 MeV protons at normal incidence, the number of protons was 300102. Nuclear reactions were not taken into account in the calculation. As a result of the conducted studies, it was found that for every 300100 protons that flew through the entire model, there were 2 backscattered protons. The results of the proton distribution along the calculation model and in the cross section at the end of the model are presented. The results of the conducted studies allow us to estimate the spatial and energy distribution of protons in the cyclotron target foil holder, which can be used to optimize the enriched water irradiation process by cyclotron operators. The obtained results can serve as a basis for further research aimed at assessing the fatigue level of target foils and developing recommendations for their replacement frequency during maintenance.

**Keywords:** *cyclotron, target, protons, beam, foils, proton distribution, vacancies.*